

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Návrh vn přípojky pro park VE.

Design of MV connecting of Wind Power Stations.

2012

Bc. Pavel Bobák

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Pavel Bobák**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Návrh vn přípojky pro park VE.**
Design of MV connecting of Wind Power Stations.

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor sítě vn
2. Podmínky připojení generátoru do distribuční sítě VN.
3. Rozbor zpětných vlivů větrné elektrárny na distribuční síť.
4. Obecné zásady při projektování venkovního i kabelového vedení
5. Návrh přípojky na hladině 22 kV i 35 kV
6. Výběr optimální varianty
7. Technicko-ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Santarius, P.: Elektrické stanice a vedení, Skripta VŠB-TU Ostrava, 1990
2. Hodinka, M.: Přenos a rozvod elektrické energie, SNTL, 1989
3. Trojánek, Z.: Přejídné jevy v elektrizačních soustavách, SNTL 1987
4. Dohnálek, P.: Ochrany pro průmysl a energetiku, SNTL, 1991
5. Normy, firemní literatura, předpisy a směrnice ČEZ

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Jiří Gurecký**

Datum zadání: 30.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry





prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě 4. 5. 2012


.....
Podpis

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Dr. Ing. Jiřímu Gureckému za cenné rady a připomínky k obsahu mé práce. A zároveň oponentovi Ing. Lukáši Pracnému za poskytnutí údajů k vypracování praktické části práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem přípojky pro park větrných elektráren. V teoretické části je popsán rozbor sítí vysokého napětí, podmínky připojení generátoru do distribuční sítě a zpětné vlivy elektrárny na distribuční síť.

V praktické části je vypracován návrh přípojky pro větrné elektrárny v oblasti Horní Životice–Rejchartice. Návrh je vypracován pro několik variant – pro hladinu 22 kV a 35 kV a pro dva typy vodiče (měděný a hliníkový). V této části je také zahrnut návrh transformátorů a výpočet celkových ztrát. Na závěr je proveden výběr a doporučení optimální varianty pomocí metody CDA a technicko-ekonomické zhodnocení jednotlivých variant.

Klíčová slova

Vedení vysokého napětí, návrh, přípojka vysokého napětí, kabelové vedení, distribuční síť, větrné elektrárny, průřez vodiče, transformátory, dimenzování vodiče, jištění.

Abstract

This thesis deals with the design of connections for wind power plants park. The theoretical part describes the analysis of high-voltage networks, the connection conditions of the generator to the distribution network and the feedback effects of power plant to distribution network.

In the practical part is a concept of connections for wind power plants in the area of Horní Životice–Rejchartice. Design is prepared for several variants – for level of 22 kV and 35 kV and for two types of wires (copper and aluminum). This section is also included design of transformers and calculation of total losses. Finally, recommendations were selected and optimal concept using the CDA method and technical-economic evaluation of various options.

Key Words

Wire-guided high-voltage design, high-voltage connector, cable management, distribution network, wind power plants, cross-section conductors, transformers, wire dimensioning, electrical protection.

Seznam použitých zkratk a symbolů

A	hospodárný průřez (mm^2)
DS	distribuční soustava
HDO	hromadné dálkové ovládání
I	proud protékající vodičem (A)
I_A	proud zajišťující samočinné odpojení (A)
I_a	rozběhový proud (A)
I_{dov}	dovolená zatížitelnost vodiče (A)
I_ξ	činný proud (A)
I_j	jalový proud (A)
I_k''	počáteční rázový zkratový proud (A)
I_{ke}	ekvivalentní oteplovací proud (A)
I_{KM}	nárazový zkratový proud (A)
I_N	jmenovitý proud (A)
I_{nG}	jmenovitý proud generátoru (A)
I_{nj}	jmenovitý proud jističe (A)
I_{np}	jmenovitý proud pojistky (A)
I_p	výpočtový proud (A)
K	koefficient respektující teplotu jádra kabelu před a po zkratu
L_K	indukčnost vodiče vztažená na 1 km délky (H/km)
NN	nízké napětí
P_i	instalovaný výkon (W)
P_{lt}	dlouhodobá míra vjemu flikru
P_p	výpočtový výkon (W)
PDS	provozovatel distribuční soustavy
ΔP	činné ztráty (W)
ΔP_{KN}	činné ztráty jmenovité transformátoru nakrátko (W)
ΔP_T	činné ztráty transformátoru (W)
ΔP_0	činné ztráty transformátoru naprázdno (W)
R	činný odpor (Ω)
R_k	činný odpor vodiče vztažený na 1 km délky (Ω/km)
S	průřez vodiče (mm^2)
S_A	jmenovitý zdánlivý výkon výroby (VA)
S_{Amax}	maximální zdánlivý výkon výroby (VA)
S_{Emax}	maximální zdánlivý výkon jednotlivého zařízení (VA)
S_{kV}	zkratový výkon v přípojném bodu (VA)
S_{MIN}	minimální hodnota průřezu vodiče (mm^2)
S_N	jmenovitý výkon transformátoru (VA)
S_{nG}	jmenovitý zdánlivý výkon generátoru (VA)
S_{nE}	jmenovitý zdánlivý výkon výrobního bloku (VA)
S_{rA}	jmenovitý výkon celého zařízení (VA)
S_T	instalovaný výkon transformátoru (VA)
U_n	jmenovité napětí sítě (V)

U_s	sdužené napětí (V)
ΔU	úbytek napětí (V)
ΔU_f	hodnota fázového úbytku napětí (V)
U_f	fázové napětí (V)
U_s	sdužené napětí (V)
U_0	jmenovité napětí proti zemi (V)
VN	vysoké napětí
VVN	velmi vysoké napětí
X_k	induktivní reaktance (Ω/km)
Z	impedance sítě (Ω)
Z_s	impedance poruchové smyčky (Ω)
β	soudobost
ϑ	teplota ($^{\circ}\text{C}$)
λ	účinník – podíl činného a zdánlivého výkonu
ρ	měrný odpor vodiče ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)
φ	fázový úhel mezi proudem a napětím ($^{\circ}$)
φ_i	fázový úhel proudu vlastního zdroje ($^{\circ}$)
γ	koeficient využití transformátoru
γ_s	skutečný koeficient využití
ν	řád harmonické
ψ	úhel impedance sítě ($^{\circ}$)
ψ_{kV}	fázový úhel zkratové impedance ($^{\circ}$)
a	vzdálenost vodičů (m)
c	činitel flikru zařízení
c	napěťový činitel
$\cos\varphi$	účinník
Δf	rozdíl frekvence (Hz)
$i(t)$	proud při poruše (A)
i_v	vztažný proud (A)
k	součinitel mechanické pevnosti
k_e	činitel respektující místo zkratu a dobu trvání
k_{imax}	největší spínací ráz
k_{k1}	zkratový poměr
k_p	součinitel přiřazení pojistky k vodiči
k_1	koeficient tvaru vodiče
k_2	koeficient respektující uspořádání vodičů a fázový posuv proudů
l	délka vedení (m)
$p_{10\text{min}}$	maximální střední výkon v intervalu 10 minut
r	vnitřní odpor chráněného objektu
t_K	doba trvání zkratu (s)
t_p	doba působení ochrany (s)
t_z	doba plných ztrát za rok (h/rok)
t_z	doba trvání poruchy (s)
t_0	doba působení ovládacího zařízení (s)

Δu	změna napětí výroby v předávacím místě (V)
Δu_{dov}	dovolený úbytek napětí (V)
Δu_{ers}	fiktivní náhradní změna napětí (V)
Δu_{AV}	zvýšení napětí v přípojném bodu (V)
$\Delta u_{3f} \%$	vyjádření procentního úbytku napětí (V)
VE	větrná elektrárna
w	akumulovaná energie

Obsah

ÚVOD	12
1 ROZBOR SÍTÍ VN	13
1.1 ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA	13
1.1.1 Přenosová soustava.....	13
1.1.2 Distribuční soustava.....	13
1.2 TYPY ROZVODNÝCH SÍTÍ	14
1.2.1 Paprsková síť.....	14
1.2.2 Okružní síť.....	15
1.2.3 Zauzlená síť.....	15
1.3 ELEKTRICKÉ VEDENÍ.....	16
1.3.1 Venkovní vedení	17
1.3.2 Kabelové vedení	17
1.4 ELEKTRICKÉ STANICE	18
1.4.1 Hlavní části elektrických stanic.....	18
1.4.2 Základní dělení elektrických stanic	18
1.4.3 Schémata elektrických stanic.....	19
2 PODMÍNKY PŘIPOJENÍ GENERÁTORU DO DISTRIBUČNÍ SÍTĚ VN.....	21
2.1 ZVÝŠENÍ NAPĚTÍ	21
2.2 ZMĚNY NAPĚTÍ PŘI SPÍNÁNÍ	23
2.3 PŘIPOJOVÁNÍ SYNCHRONNÍCH GENERÁTORŮ	25
2.4 PŘIPOJOVÁNÍ ASYNCHRONNÍCH GENERÁTORŮ	25
3 ROZBOR ZPĚTNÝCH VLIVŮ VE NA DISTRIBUČNÍ SÍŤ	26
3.1 ZMĚNA NAPĚTÍ	26
3.2 FLIKR.....	26
3.3 PROUDY HARMONICKÝCH.....	27
3.3.1 Výrobní v síti nn.....	27
3.3.2 Výrobní v síti vn.....	28
3.4 OVLIVNĚNÍ ZAŘÍZENÍ HDO	29
4 OBECNÉ ZÁSADY PŘI PROJEKTOVÁNÍ KABELOVÉHO VEDENÍ	31
4.1 PROUDOVÉ ZATÍŽENÍ VODIČE S OHLEDEM NA OTEPLENÍ	31
4.1.1 Dovolená provozní teplota	31
4.1.2 Dovolené proudové zatížení	32
4.2 ODOLNOST VŮČI ZKRATOVÝM PROUDŮM	32

4.2.1	<i>Tepelné účinky</i>	32
4.2.2	<i>Dynamické účinky</i>	33
4.3	ÚBYTEK NAPĚTÍ NA VEDENÍ.....	33
4.4	HOSPODÁRNOST VEDENÍ.....	34
4.5	MECHANICKÁ PEVNOST	34
4.6	BEZPEČNOST PROVOZU	34
4.7	JISTĚNÍ VEDENÍ	35
4.7.1	<i>Požadavky kladené na ochrany a jištění</i>	35
4.7.2	<i>Jištění vodičů pojistkami</i>	37
4.7.3	<i>Jištění vodičů jističi</i>	38
5	NÁVRH PŘÍPOJKY NA HLADINĚ 22 KV I 35 KV	39
5.1	NÁVRH PŘÍPOJKY NA HLADINĚ 22 KV.....	39
5.1.1	<i>Výpočet velikosti instalovaných výkonů transformátorů</i>	40
5.1.2	<i>Výpočtový proud</i>	41
5.1.3	<i>Návrh a dimenzování vedení na hladině 22 kV – jádro Cu</i>	41
5.1.4	<i>Výpočet ztrát</i>	47
5.1.5	<i>Návrh a dimenzování vedení na hladině 22 kV – jádro Al</i>	48
5.1.6	<i>Výpočet ztrát</i>	52
5.2	NÁVRH PŘÍPOJKY NA HLADINĚ 35 KV.....	53
5.2.1	<i>Výpočet velikosti instalovaných výkonů transformátorů</i>	53
5.2.2	<i>Výpočtový proud</i>	53
5.2.3	<i>Návrh a dimenzování vedení na hladině 35 kV – jádro Cu</i>	54
5.2.4	<i>Výpočet ztrát</i>	57
5.2.5	<i>Návrh a dimenzování vedení na hladině 35 kV – jádro Al</i>	57
5.2.6	<i>Výpočet ztrát</i>	61
6	VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY	62
6.1	CELKOVÉ ČINNÉ ZTRÁTY PŘÍPOJKY:	62
6.2	CELKOVÉ INVESTIČNÍ NÁKLADY PŘÍPOJKY:	62
6.2.1	<i>Investiční náklady transformátorů:</i>	<i>63</i>
6.2.2	<i>Investiční náklady vedení:</i>	<i>63</i>
6.2.3	<i>Celkové investiční náklady:.....</i>	<i>63</i>
6.3	ČISTÁ SOUČASNÁ HODNOTA	64
6.4	MULTIKRITERIÁLNÍ ANALÝZA	65
7	TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	68
ZÁVĚR	69

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	70
--	-----------

SEZNAM PŘÍLOH:.....	71
----------------------------	-----------

Úvod

Je všeobecně známo, že spotřeba energie neustále roste, čímž stoupají i požadavky na její výrobu. Všichni víme, že výrazný podíl na výrobě elektrické energie mají fosilní paliva a jaderná energie. S postupem času se čím dál více začíná přihlížet na bezpečnost při zásobování energií a na dopad vyrobené energie z fosilních paliv na životní prostředí. Lidstvo si pomalu začíná uvědomovat fakt, že jednoho dne může dojít k vyčerpání fosilních paliv a nastane potřeba je něčím nahradit. Z toho důvodu dochází ke stále většímu vývoji a instalaci alternativních zdrojů energie, jejichž efektivita využívání se stále zvyšuje. Tyto zdroje je však potřeba uplatňovat v přijatelné míře, aby nenarušily stabilitu sítí. U nás v poslední době roste zastoupení větrných elektráren.

Práce se zabývá návrhem přípojky pro park větrných elektráren v oblasti Horní Životice–Rejchartice pro hladinu 22kV a 35kV a pro dva různé materiály vodičů – hliníkový a měděný. Cílem práce je přípojku navrhnout, následně zkontrolovat varianty dle rozličných kritérií a určit optimální variantu.

Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části tvoří úvodní kapitolu rozbor sítí, kde se dozvíme o používaných typech rozvodných sítí, jejich uplatnění, výhodách a nevýhodách jednotlivých typů. Dále zde nalezneme stručný nástin kabelového a venkovního vedení a základní popis elektrických stanic. Druhá kapitola je věnována podmínkám pro připojení generátoru do distribuční sítě a zpětným vlivům větrných elektráren, kterými působí na distribuční síť. Třetí část pojednává o hlavních zásadách, kterými je ovlivněno projektované vedení. Jedná se zejména dovozené oteplení vodiče, hospodárný průřez, dovolený úbytek napětí atd.. Na základě těchto zásad jsou provedeny výpočty v praktické části.

Další kapitola se už řadí do praktické etapy práce. Zde je umístěn návrh velikosti použitých transformátorů přípojky a průřezu vodiče na hladinách 22 kV a 35 kV. Návrh je proveden zvlášť pro vedení měděné a hliníkové. Tento navrhnutý průřez je pak zkontrolován podle základních hledisek a nakonec je zařazen výpočet celkových činných ztrát přípojky. Na základě zadaných a vypočítaných hodnot je proveden výběr optimální varianty, kterým se zabývá poslední část práce. Z těchto hodnot vzniknou kritéria pro dané varianty přípojky, na jejichž základě je samotný výběr uskutečněn. Na úplný závěr je provedeno technicko-ekonomické zhodnocení přípojky, ve kterém jsou porovnány jednotlivé možnosti a určen výsledný návrh.

1 Rozbor sítí vn

1.1 Elektrizační soustava

Základním celkem, který složí k přenosu a rozvodu elektrické energie z daných výroben do míst spotřeby, je elektrizační soustava. Tu lze rozložit na přenosovou soustavu a rozvodnou soustavu (distribuční).

1.1.1 Přenosová soustava

Přenosovou síť na území České republiky provozujeme na hladinách 400 kV, 220 kV a pro některé případy i 110 kV. V přenosové soustavě jsou přenášeny velké výkony mezi důležitými hlavními uzly elektrizační soustavy. Slouží také k propojení s elektrizačními soustavami sousedních zemí.

1.1.2 Distribuční soustava

Úkolem rozvodné soustavy je rozdělení elektrické energie z napájecích uzlů do jednotlivých skupin nebo oblastí spotřebičů, popřípadě k jednotlivým spotřebičům. Rozvodné soustavy veřejné jsou využity k napájení oblastí terciální sféry (obchodní centra, byty, apod.) dále rozvodných sítí zemědělských, dopravních a průmyslových. Hladiny napětí pro distribuční soustavy v ČR jsou 35 kV, 22 kV, 10 kV, 6 kV, 3 kV, 0,4/0,23 kV a 110 kV vyjma těch, které jsou součástí přenosové soustavy.

Z hospodářského rozvoje plyne, že elektrizační soustava a každá její část musí co nejvhodněji plnit řadu požadavků. Jsou to zejména tyto:

- zajišťovat bezpečnost osob
- zajišťovat spolehlivou, dostatečnou a kvalitní dodávku elektrické energie spotřebitelům
- pracovat s vysokou účinností
- výrazně snižovat náročnost prací v provozu a v údržbě soustavy
- využívat odpadního tepla
- pracovat s vyššími parametry a větším počtem zdrojů a elektrických stanic
- být materiálově nenáročná (zejména pokud jde o deficitní materiály)
- umožňovat řízení odběru elektrické energie
- zabránovat nepříznivým vlivům soustavy na okolí (životní prostředí). [4]

Složení elektrizační soustavy je realizováno za pomoci zdrojů, elektrických stanic a jednotlivých druhů sítí.

Zdroje (elektrárny) se do soustav nejvyššího napětí 400 kV nebo 220 kV zapojují přímo. Případně mohou být připojeny i na síť 110 kV, ty pak dodávají energii do přenosových soustav přes zvyšovací transformátory. Elektrické stanice tvoří uzly přenosové soustavy. Mezi funkce těchto stanic patří spínání různých větví soustavy a transformování elektrické energie na jinou hladinu napětí, většinou na distribuční napětí 110 kV v transformovnách 400/110 kV nebo 220/110 kV. Obě funkce probíhají obvykle v jedné stanici. Veřejné rozvodné soustavy jsou pak

napájeny z těchto stanic.

Nepostradatelnou součástí elektrizačních soustav jsou elektrické stanice. Pomocí nich se propojují sítě různých napěťových a proudových soustav. Přes tyto stanice se ovlivňují jednotlivé sítě navzájem, proto musí být řešeny tak, aby zvládly transfigurace umožněné propojovanými sítěmi. Neméně důležitá je pak jejich volba umístění v elektrizační soustavě.

Za elektrické sítě se považují všechny galvanicky spojené úseky stejného napětí. Transformovny nebo měnirny od sebe oddělují sítě jednotlivých napěťových a proudových soustav. V rámci elektrizační soustavy se jedná o sítě 110 kV, 22 kV apod.

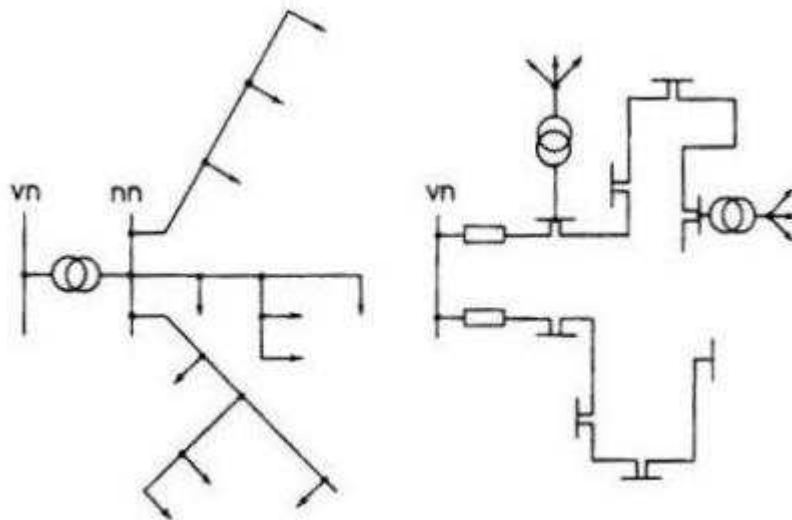
1.2 Typy rozvodných sítí

Neustále rostoucí spotřeba elektrické energie a zvyšující se hustota osídlení v městských aglomeracích způsobuje nové problémy spojené s potřebou větších transformačních jednotek a se spolehlivostí starých sítí. Na základě tohoto faktu se uskutečňují studie o optimálním počtu napěťových stupňů, optimální velikosti transformačních jednotek, hospodárném napájení městských aglomerací atd.

Podle způsobu provedení propojení se sítě rozdělují na paprskové, okružní a zauzlené.

1.2.1 Paprsková síť

Vedení, v kabelovém či venkovním provedení, vychází z napájecího místa a zásobuje jednotlivé odběry. Napájecím místem může být spínací stanice či rozvodna vn. Každý paprsek (vývod) je vyveden samostatně a není možné jej zálohovat. Výhodou takového způsobu rozvodu je jeho nízká cena. Naopak nevýhodou je, že takto provozovaná síť zajišťuje malou spolehlivost dodávky elektrické energie.

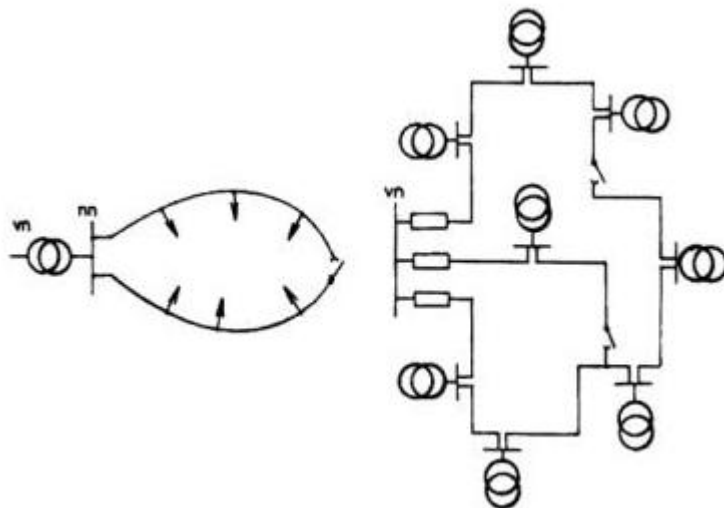


Obr. 1-1 Paprsková síť nn a vn [4]

V případě poruchy je přerušení dodávky značně dlouhé (až několik hodin a déle). Této síti se využívá v oblasti běžných nároků na spolehlivost, tedy v malých vesnicích a městech.

1.2.2 Okružní síť

V místech se zvýšeným počtem odběru docházelo k zahušťování sítí a začaly vznikat sítě okružní. Okružní síť, někdy nazývané smyčkové, se dají provozovat ve dvou stavech, a to buď v rozepnutém, nebo sepnutém. Za normálních okolností se provozují v rozepnutém stavu, při poruše přechází do sepnutého stavu. Uspořádání jednotlivých paprsků (polosmyček) je provedeno takovým způsobem, aby se daly propojit ve spínacích trafostanicích.



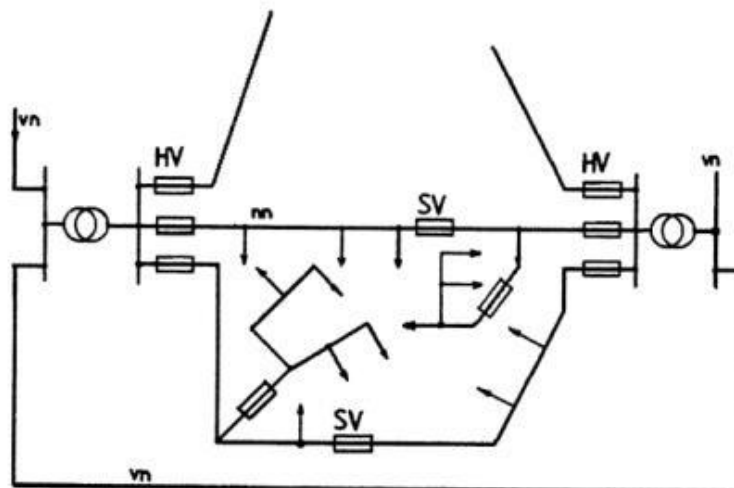
Obr. 1–2 Okružní síť [4]

Provoz je pak velice podobný paprskové síti s tím rozdílem, že při poruše určitého úseku lze velmi rychle (automaticky nebo ručně) zajistit jeho náhradní zásobení. Z toho plyne větší spolehlivost dodávky, ale také vyšší cena způsobená delším vedením pro vzájemné spojení. Jedna z dalších výhod tohoto systému je možnost rovnoměrnějšího rozdělení zatížení do jednotlivých vývodů, dále snadné hledání poruch, nenáročnost a přehlednost. V praxi se tento způsob využívá pro napěťové hladiny nn, vn a vvn.

1.2.3 Zauzlená síť

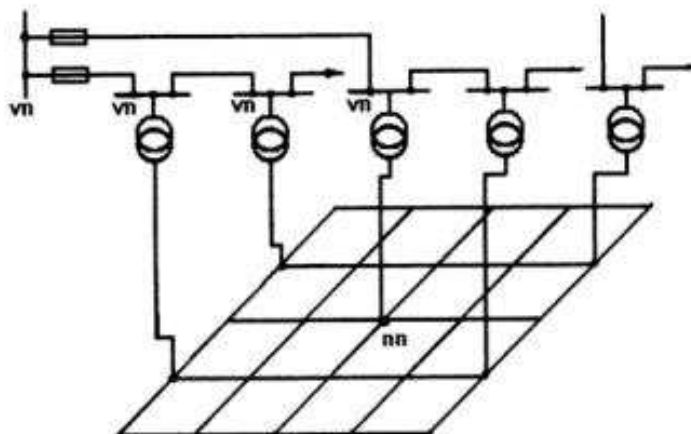
K budování zauzlených sítí přispěl další nárůst zatížení. Nejvíce se používají u kabelových vedení nízkého napětí a pro některé případy také u sítí vn. V zauzlených sítích se vyskytuje více napáječů a tyto sítě jsou tvořeny několika oky. Zauzlené síť můžeme rozdělit na zjednodušené mřížové a klasické mřížové síť.

Zjednodušená mřížová síť vznikne za předpokladu, že pracuje nejméně se dvěma napáječi (transformátory). Mezi nimi je spojovací vedení o větším průřezu, které je jištěno výkonovými pojistkami. Pojistky slabé vazby jsou v místech tzv. kritického průřezu. Tyto pojistky mají poloviční jmenovitou hodnotu hlavních pojistek. Při poruše tak pojistka slabé vazby zareaguje jako první a až pak pojistka hlavní. Díky tomu dojde k odpojení jen té části, kde porucha vedení vznikla. Zjednodušené mřížové síť se používají v místech řidší zástavby a při výpadku jednoho z transformátorů je možno zajistit jeho zások.



Obr. 1–3 Zjednodušená mřížová síť [4]

Klasická mřížová síť se využívá k napájení větších měst s měrnou hustotou 1000 kW/km^2 a větší. Má několik transformoven, které jsou napájeny více napáječi vn, obvykle třemi až pěti. Na křižovatkách ulic je kabelové vedení nn spojeno do uzlů, v nichž je jištěno pojistkami, které se vyznačují pomalou charakteristikou a stejnou jmenovitou hodnotou, čímž se zaručí velká selektivita jištění sítě. Při poruše dojde k vypnutí pouze té části vedení, na které porucha vznikla. Nastane-li porucha na vedení vn, mohla by způsobit škody i na straně nn, proto se za transformátor v napájecích uzlech mřížové sítě umísťují zpětná relé. Ta odpojí transformátor současně s hlavním vypínačem, aby nedošlo k destrukci uzlových pojistek nn.



Obr. 1–4 Klasická mřížová síť [4]

Výhodou mřížových sítí je zmenšení ztrát, velká spolehlivost dodávky elektrické energie, zlepšení kvality napětí, lepší využití vedení a transformátorů. Mezi nevýhody patří např. zvětšení zkratových výkonů v síti nn a vznik zpětného napětí při poruchách. [4]

1.3 Elektrické vedení

Základním prvkem distribučních a přenosových sítí je elektrické vedení, které představuje soubor vodičů, izolačních materiálů a konstrukcí pro přenos elektrické energie mezi dvěma

místa elektrické sítě. Podle konstrukčního hlediska se vedení rozlišuje na venkovní a kabelové.

1.3.1 Venkovní vedení

Venkovní elektrické vedení je prováděno pomocí lan, drátů a závěsných izolovaných vodičů. V případě potřeby větší mechanické pevnosti se používají lana složená ze dvou materiálů. Z pravidla jsou ocelohliníková, kde ke zlepšení mechanických vlastností slouží vnitřní ocelový drát, který je opleten dráty hliníkovými. Návrh vodičů pro venkovní vedení je výrazně složitější a to zejména kvůli extrémním vnějším vlivům, které na vodič během doby života působí.

Použití venkovních vedení se uplatňuje především tam, kde není velká hustota zatížení a kde je dostatek volného prostoru. Pořizovací cena venkovního vedení je mnohem nižší oproti kabelovému, ale náklady spojené s údržbou a provozem jsou vyšší. I přesto se kvůli nízké pořizovací ceně upřednostňuje výstavba venkovního vedení. Uplatnit venkovní vedení lze na všech napěťových hladinách.

1.3.2 Kabelové vedení

Výstavba kabelového vedení se provádí především v městských aglomeracích. Jeho užití je však i mimo města v místech, kde není možné uplatnit venkovní vedení z bezpečnostních, prostorových, či jiných mimořádných důvodů (např. chemicky agresivní ovzduší, kritické námrazové oblasti). Pro silová vedení vn a vvn se obvykle používají jednožilové kabely, pro nižší napěťové hladiny kabely vícežilové.

Pro ukázkou je na Obr. 1–5 běžně využívaný kabel typu AXEKVCEY, s nímž se v praxi můžeme setkat, kde: 1 – hliníkové jádro, 2 – vnitřní polovodivá vrstva, 3 – izolace ze stíněného polyetylenu, 4 – vnější polovodivá vrstva, 5 – polovodivá vodoblokující páska, 6 – stínění měděnými dráty s protispirálou z měděné pásky, 7 – vodoblokující páska, 8 – vnější plášť PE+PVC.



Obr. 1–5 Kabel AXEKVCEY [14]

Jak je uvedeno výše, hlavní nevýhodou kabelového vedení jsou pořizovací náklady. Mechanický návrh je však jednodušší a u největších průřezů mají trojfázová kabelová vedení z jednožilových kabelů výhody, jako např. jednodušší montáž, větší výrobní délky a spolehlivější koncovky i spojky.

Jedním z nejdůležitějších faktorů kabelového vedení je jeho ukládání, které spočívá v dodržení normou předepsané hloubky uložení, povoleného ohybu atp.

1.4 Elektrické stanice

Ucelená zařízení uzlu elektrizační soustavy se nazývají elektrické stanice. Tyto stanice mohou sloužit k transformaci, rozvodu, přeměně a kompenzaci elektrické energie.

V transformovných dochází k „transformaci“ elektrické energie na jinou hladinu napětí a k jejímu rozvádění. „Měnič“ jsou stanice, které slouží ke změně elektrického střídavého proudu na proud o jiném kmitočtu, nebo proud stejnosměrný a k jeho dalšímu rozvodu. Spínací stanice slouží k rozvádění energie o stejném napětí. Další součástí elektrických stanic, průmyslových závodů, nebo rozvodných zařízení jsou „kompenzovny“, které slouží k vyrovnávání jalových složek proudů.

1.4.1 Hlavní části elektrických stanic

a. elektrická část

- transformovny jsou jednou z nejdůležitějších částí elektrické stanice – slouží k jistění, měření, rozvádění, kontrolu elektřiny a také pro přepínání a spínání elektrických obvodů
- transformátory
- kompenzační zařízení rotační, nebo statické

b. společná a pomocná část

- jenž slouží k zabezpečení provozu a údržby elektrických stanic (olejové hospodářství, sklady, administrativa atp.)

c. stavební část

- sem patří komunikace, pozemky, budovy a jiné náležitosti, které se týkají stavby elektrických stanic

1.4.2 Základní dělení elektrických stanic

Rozdělení elektrických stanic lze provést podle různých hledisek, např.:

a. podle účelu

- transformovny sloužící k transformaci elektrické energie na potřebné napětí a k jejímu rozvodu
- spínací stanice, sloužící k rozvodu elektrické energie téhož napětí
- měnič sloužící k přeměně střídavé proudové soustavy na soustavy jiného kmitočtu nebo stejnosměrné

b. podle způsobu obsluhy

- s trvalou obsluhou
- bez obsluhy s pravidelným dozorem
- bez obsluhy s dálkovým ovládáním [6]

1.4.3 Schémata elektrických stanic

Schémata elektrických stanic nám určují provozní vlastnosti těchto stanic a druh schématu je stanoven řadou parametrů. Např.:

- provozní požadavky (zapojení do elektrizační soustavy)
- bezpečnost provozu (ochrana před úrazem, ochrana před zkratovými proudy, zamezení chybné manipulace)
- provozní a investiční hospodárnost

Je-li to možné, schémata elektrických stanic se volí s ohledem na přehlednost a co největší jednoduchost. Schéma se tvoří pomocí přípojníc a odboček.

Odbočky

Odbočky jsou základní součástí rozvodného zařízení. Odbočky tvoří soubor připojených přístrojů, které slouží zejména ke spínání, měření a ochraně přívodů nebo vývodů elektrické energie. Odbočky dělíme dle funkce:

- a. hlavní
 - transformátorové
 - alternátorové
 - vývodové
 - venkovní
 - kabelové
 - motorové
 - tlumivkové
 - kondenzátorové
 - jiné
- b. pomocné
 - spínače hlavních přípojníc
 - spínače pomocných přípojníc
 - pro měření napětí
 - pro bleskojistky

Odbočky také dělíme podle výstroje:

- provozní
- záložní
 - s plnou výstrojí
 - s částečnou výstrojí [6]

Přípojnice

Prostředkem k propojení odboček mezi sebou jsou přípojnice. Přípojnice představují holé vodiče o průřezu, který je dán jejich proudovým zatížením, zkratovými poměry a požadavky na pevnost. U rozvodných zařízení lze použít i více systémů přípojníc, podle druhu použitého schématu. Rozvodná zařízení se pak provozují podle počtu a druhů přípojníc:

- a. s přímými přípojnícemi
 - jednoduchými
 - jednoduchými a pomocnými
 - dvojitými
 - dvojitými s jednou ve funkci pomocné přípojnice
 - dvojitými a pomocnými
 - trojitými
 - trojitými a pomocnými
- b. s okružními přípojnícemi
 - bez záložního spínače
 - se záložním spínačem
- c. bez přípojníc (např. spojení H)
- d. s větším počtem vypínačů na odbočku [6]

2 Podmínky připojení generátoru do distribuční sítě vn

Aby výrobce mohl větrnou elektrárnu nebo farmu větrných elektráren připojit do distribuční sítě, musí požádat o připojení, podstoupit přihlašovací řízení s danými zákonnými normami a splnit podmínky pro připojení, které jsou dány provozovatelem distribuční sítě – Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribučních soustav. Žádost o připojení musí obsahovat technické specifikace připojovaného výrobního zdroje a dále je třeba znát konfiguraci sítě a místo, kam by měl být nový zdroj připojen. Na základě těchto technických specifikací je třeba provést studii připojitelnosti, ve které se zkoumá, zda může být nový výrobní zdroj připojen na základě Pravidel pro paralelní provoz zdrojů do distribuční sítě.

Při posuzování jsou vyhodnocovány následující parametry: zvýšení napětí po připojení, zvýšení napětí při spínání, flicker (souvisí s kolísáním), proudy vyšších harmonických a ovlivnění zařízení HDO (hromadné dálkové ovládání). Pokud jsou všechny podmínky pro připojení splněny, je možné přistoupit k realizaci projektu výstavby. Po realizaci výroby a předložení podkladu povolí provozovatel distribuční sítě na základě požadavků výrobce zkušební provoz výroby. Po ukončení zkušebního provozu je povolena kontrola výroby, která zahrnuje potřebné zkoušky a měření. Pokud jsou zkoušky a měření v pořádku, slouží tyto materiály pro uzavření smlouvy o připojení výrobního zařízení k distribuční síti. [11]

Aby se zabránilo zavlečení zpětného napětí do sítí provozovatele distribuční soustavy, dále jen PDS, je nutné zařídit jistá technická opatření. A to taková, aby bylo možno připojení vlastní výroby (větrné elektrárny) k síti PDS pouze tehdy, když jsou pod napětím všechny fáze sítě.

Připojení dané výroby lze provést jak spínačem, který se sítí spojuje celé zařízení odběratele, tak spínačem, který spojuje generátor popř. více paralelních generátorů, se zbylým zařízením odběratele. Dokud není na každé fázi napětí větší a to minimálně nad rozběhovou hodnotu podpět'ové ochrany, musí být zapnutí vazebního spínače blokováno. Časové zpoždění, které se doporučuje k ochraně výroby, je mezi obnovením napětí v síti a připojením výroby v rozsahu minut.

V případě časového odstupňování při připojování více generátorů v jednom společném předávacím místě je nutný souhlas PDS.

2.1 Zvýšení napětí

V nejméně příznivém případě nesmí zvýšení napětí, které je vyvolané provozem připojených výroben, překročit 2 %. To platí pro výroby s přípojným místem v síti vn a 110 kV ve srovnání s napětím bez jejich připojení

$$\Delta u_{vn,110} \leq 2 \% , \quad (2.1)$$

pro výroby s přípojným místem nn platí, že nesmí překročit 3 %

$$\Delta u_{nn} \leq 3 \% . \quad (2.2)$$

Je-li pouze jedno přípojně místo v síti nn a vn, mohou se tyto podmínky posoudit pomocí zkratového poměru výkonů

$$k_{k1} = \frac{S_{kV}}{\sum S_{Amax}} , \quad (2.3)$$

kde:

- S_{kV} je zkratový výkon v přípojném bodu,
- ΣS_{Amax} je součet maximálních zdánlivých výkonů všech připojených/plánovaných výroben

U větrných elektráren je k vyšetření S_{Amax} potřeba vycházet z maximálních zdánlivých výkonů jednotlivého zařízení S_{Emax} :

$$S_{Emax} = S_{Emax10min} = S_{nG} \cdot p_{10min} = \frac{P_{nG}}{\lambda} \cdot p_{10min}, \quad (2.4)$$

- p_{10min} maximální střední výkon v intervalu 10 minut.

Tuto hodnotu je zapotřebí převzít ze zkušebního protokolu. U zařízení se speciálním omezením výkonů je nutné dosadit tyto omezené hodnoty.

V síti s jediným předávacím místem bude podmínka pro zvýšení napětí splněna vždy, když bude hodnota zkratového poměru výkonů k_{k1} pro všechny výroby s předávacím místem v síti vn

$$k_{k1vn} \geq 50, \quad (2.5)$$

podobně je tomu pro výroby s předávacím místem v síti nn

$$k_{k1nn} \geq 33. \quad (2.6)$$

V případě, že je síť vn a nn silně induktivní, považuje se posouzení pomocí činitele k_{k1} za velmi kontroverzní. Znamená to, že dodávaný výkon bude omezen silněji, než je potřeba k dodržení zvýšení napětí. Je tedy nutno provést výpočet s komplexní hodnotou impedance sítě s jejím fázovým úhlem ψ_{kV} . Tento výpočet zaručí mnohem přesnější výsledek.

U výroben s předávacím místem v síti vn je pak podmínka pro maximální výkon

$$S_{Amax} \leq \frac{2\% \cdot S_{kV}}{|\cos(\psi_{kV} - \varphi)|} = \frac{S_{kV}}{50 \cdot |\cos(\psi_{kV} - \varphi)|}, \quad (2.7)$$

pro výroby s předávacím místem v síti nn

$$S_{Amax} \leq \frac{2\% \cdot S_{kV}}{|\cos(\psi_{kV} - \varphi)|} = \frac{S_{kV}}{50 \cdot |\cos(\psi_{kV} - \varphi)|}, \quad (2.8)$$

kde:

- φ je fázový úhel mezi proudem a napětím výroby při maximálním zdánlivém výkonu S_{Amax} .

Pro výroby dodávající do sítě jalový výkon (pulzní měniče, přebuzené synchronní generátory) platí:

$$P > 0 \text{ a } Q > 0$$

$$0^\circ \leq \varphi_E \leq 90^\circ.$$

Pro výrobní odebírající ze sítě jalový výkon (sítě řízené střídače, asynchronní generátory, podbuzené synchronní generátory) platí:

$$P > 0 \text{ a } Q < 0$$

$$270^\circ \leq \varphi_E \leq 360^\circ \quad (-90^\circ \leq \varphi_E \leq 0^\circ).$$

V praxi se v mnoha případech udává maximální připojitelný výkon S_{Amax} , pro který je potřeba určit zvýšení napětí v přípojném bodu. K tomuto výpočtu se využívá následujícího vztahu:

$$\Delta u_{AV} = \frac{S_{Amax} \cdot \cos(\psi_{kV} - \varphi)}{S_{kV}} \quad (2.9)$$

Určovat zvýšení napětí s pomocí komplexního chodu sítě je zapotřebí v propojených sítích, v sítích 110 kV a při provozu rozptýlených výroben v síti. Podmínka pro Δu přitom musí být dodržena i v nejméně příznivém přípojném bodě.

Z neutrálního účinku v předávacím místě do distribuční soustavy se vychází při posuzování připojitelnosti výroben, pokud PDS s ohledem na místní podmínky (napětí v síti, bilance jalové energie) nestanoví jinak. Pro takový případ je pak nutno doložit bilanci ztrát v síti bez zdroje a při jeho provozu podrobnějšími výpočty. [10]

2.2 Změny napětí při spínání

Jestliže největší změna napětí pro výrobní s předávacím místem v síti nn nepřekročí hodnotu 3 %, pak platí, že změny napětí ve společném napájecím bodě, které jsou způsobeny připojováním či odpojováním generátorů nebo ostatních zařízení, nevyvolají nepřípustné zpětné vlivy.

$$\Delta u_{\max nn} \leq 3 \% \quad (2.10)$$

S předávacím místem v síti vn pak pro výrobní platí

$$\Delta u_{\max vn} \leq 2 \% \quad (2.11)$$

Tyto vztahy se můžou považovat za platné, pokud spínání není častější než jednou za 1,5 minuty.

Pokud to dovolí poměry v síti, může při velmi malé četnosti spínání (např. jednou denně) PDS připustit i větší změny napětí.

Pro omezení změny napětí, která je vyvolaná spínáním u výroben v síti 110 kV platí:

Normální provoz:

Spíná-li se jedna výrobní jednotka (např. jeden generátor větrné turbíny)

$$\Delta u_{\max} \leq 0,5 \% \quad (2.12)$$

Při spínání celého zařízení, tím může být větrný park

$$\Delta u_{\max} \leq 2 \% \quad (2.13)$$

Poruchový provoz:

Pro změnu napětí při spínání celého zařízení pak platí

$$\Delta u_{\max} \leq 5 \% \quad (2.14)$$

Lze odhadnout změnu napětí v závislosti na zkratovém výkonu S_{kV} v síti PDS a jmenovitém zdánlivém výkonu S_{nE} jednotlivé výroby.

$$\Delta u_{\max} = k_{i\max} \cdot \frac{S_{nE}}{S_{kV}} \quad (2.15)$$

Jako „největší spínací ráz“ se označuje činitel $k_{i\max}$. Ten udává poměr největšího proudu, který se vyskytuje v průběhu spínacího pochodu (spínací ráz I_a) ke jmenovitému proudu generátoru nebo zařízení, např.

$$k_{i\max} = \frac{I_a}{I_{nG}} \quad (2.16)$$

Na bezpečné straně jsou výsledky na základě tohoto „největšího spínacího rázu“

Následující směrné hodnoty platí pro činitel zapínacího rázu:

- $k_{i\max} = 1$ synchronní generátory s jemnou synchronizací, střídače
- $k_{i\max} = 4$ asynchronní generátory, připojované s 95 % až 105 % synchronních otáček, pokud nejsou k dispozici přesnější údaje o způsobu omezení proudu. S ohledem na krátkodobost přechodového jevu musí přitom být dodržena dále uvedená podmínka pro velmi krátké poklesy napětí
- $k_{i\max} = I_a/I_{nG}$ asynchronní generátory motoricky rozbíhané ze sítě
- $k_{i\max} = 8$ pokud není známo I_a .

Vlivem svých vnitřních přechodných jevů mohou asynchronní stroje připojované s otáčkami blížícími se synchronním způsobit velmi krátké poklesy napětí. Pokles tohoto typu smí dosáhnout dvojnásobku jinak přípustné hodnoty, tj. pro síť nn 6 % a pro síť vn 4 %. A to pouze za předpokladu, že netrvá déle než dvě periody a následující odchylka napětí od hodnoty před poklesem napětí nepřekročí jinak přípustnou hodnotu.

Výrobce musí prokazovat speciální „činitel spínání závislý na síti“, který platí pro větrné elektrárny. Tím se hodnotí jejich spínání a respektuje také již zmíněné velmi krátké přechodné jevy. Tento činitel se udává jako funkce úhlu impedance sítě ψ pro každé zařízení ve zkušebním protokolu a respektuje nejen výši, ale i časový průběh proudu v průběhu přechodného děje.

Za pomoci tohoto činitele je možno vypočítat „náhradní změnu napětí“

$$\Delta u_{ers} = k_{i\psi} \cdot \frac{S_{nE}}{S_{kV}}, \quad (2.17)$$

ta nesmí stejně jako Δu_{\max} překročit hodnoty podle vztahů (2.10) až (2.14).

Je potřeba zabránit současnému spínání více generátorů v jednom předávacím místě a to s ohledem na minimalizaci zpětného vlivu na síť PDS. Technickým řešením je časové

odstupňování jednotlivých spínání, jež je závislé na vyvolaných změnách napětí. Musí být při maximálním přípustném výkonu minimálně 1,5 minuty. Do poloviny hodnoty zdánlivého výkonu generátoru postačí odstup 12 s. [10]

2.3 Připojování synchronních generátorů

Pro synchronní generátory je nutné použít takové synchronizační zařízení, se kterým mohou být dodrženy následující podmínky pro synchronizaci:

- rozdíl frekvence $\Delta f < \pm 0,5 \text{ Hz}$
- rozdíl napětí $\Delta U < \pm 10 \% U_n$
- rozdíl fáze $< \pm 10^\circ$.

V závislosti na poměru impedance sítě k výkonu generátoru může být nutné k zabránění nepřípustných zpětných vlivů na síť stanovit pro spínání užší meze. [10]

2.4 Připojování asynchronních generátorů

Pokud jsou asynchronní generátory rozbíhané pohonem, jejich připojení musí být provedeno bez napětí při otáčkách v rozsahu 95 % až 105 % synchronních otáček. U asynchronních generátorů, které jsou schopny ostrovního provozu a nejsou připojovány bez napětí, je zapotřebí dodržet podmínky spínání jako pro synchronní generátory. [10]

3 Rozbor zpětných vlivů VE na distribuční síť

K tomu, aby provozovaná zařízení PDS nebo jiná zařízení dalších odběratelů nebyla rušena, je potřeba snížit vlivy místních výroben. Při takovém posuzování se vychází ze zásad pro posuzování zpětných vlivů a jejich přípustných mezí. Pokud poměr zkratového výkonu sítě S_{kV} ke jmenovitému výkonu celého zařízení S_{rA} je větší než 500, mohou být výrobní připojeny bez další kontroly zpětných vlivů.

Je-li zařízení ověřeno výrobcem v uznávaném institutu, pak lze zahrnout příznivější činitel S_{kV}/S_{rG} (<500) do posuzování připojovacích podmínek.

Pro případ individuálního posuzování připojení jedné či více výroben v jednom společném napájecím bodu se vychází z následujících mezních podmínek:

3.1 Změna napětí

Pro společný napájecí bod v síti nn

$$\Delta u \leq 3 \% U_n. \quad (3.1)$$

Pro společný napájecí bod v síti vn

$$\Delta u \leq 2 \% U_n. \quad (3.2)$$

3.2 Flikr

Dlouhodobý flikr

Posuzuje-li se v jednom předávacím místě jedna nebo více výroben, je nutné dodržet ve společném napájecím bodě nn a vn mezní hodnotu. A to se zřetelem na kolísání napětí, které vyvolává flikr. Pro dodržení mezní hodnoty platí

$$P_{lt} \leq 0,46. \quad (3.3)$$

Ve společném napájecím bodě 110 kV mezní hodnotu

$$P_{lt} \leq 0,37. \quad (3.4)$$

Pomocí činitele flikru c může být určena dlouhodobá míra flikru P_{lt} jednoho zdroje

$$P_{lt} = c \cdot \frac{S_{nG}}{S_{kV}}, \quad (3.5)$$

kde:

- S_{nG} je jmenovitý zdánlivý výkon generátoru
- S_{kV} zkratový výkon ve společném napájecím bodu.

Je-li vypočtený výsledek z předchozí rovnice větší než hodnota 0,46, je možnost do tohoto výpočtu zahrnout fázové úhly. Potom se počítá dle vtahu

$$P_{lt} = c \cdot \frac{S_{nG}}{S_{kV}} |\cos(\psi_{kV} + \varphi_i)| \quad (3.6)$$

Pozn.: Je-li ve zkušebním protokolu zařízení vypočítána hodnota činitele flikru c pro úhel impedance sítě ψ a tím je udána hodnota c_ψ , použije se tato hodnota flikru. Přitom je však třeba vzít v úvahu, že v tomto případě se už kosinový člen nerespektuje, event. je roven 1.

U výroben, které mají více jednotlivých zařízení je potřeba spočítat P_{lt} pro každé zvlášť a ve společném napájecím bodě určit výslednou hodnotu pro flikr ze vztahu

$$P_{ltres} = \sqrt{\sum_i P_{lti}^2} \quad (3.7)$$

Pro zařízení s n stejnými jednotkami je výsledný činitel pro flikr

$$P_{ltres} = \sqrt{n} \cdot P_{lt} = \sqrt{n} \cdot c \cdot \frac{S_{nG}}{S_{kV}} \quad (3.8)$$

3.3 Proudý harmonických

Ke vzniku harmonických dochází především u zařízení se střídači nebo měniči frekvence. Výrobce musí udat harmonické proudy, které jsou emitované těmito zařízeními, např. zprávu o typové zkoušce.

3.3.1 Výrobný v síti nn

Jestliže nemohou být do sítě nn připojeny více než dvě vlastní výrobní s výkonem maximálním po 10 % jmenovitého výkonu distribučního transformátoru, pak pro posouzení harmonických proudů I_v mohou být použita tyto jednoduchá kritéria:

$$\text{Připustný proud } I_{vnn} = \text{vztažný proud } i_v \cdot \frac{S_{kV}}{\sin \psi_{kV}} \quad (3.9)$$

– i_v vztažný proud uveden v následující tabulce.

$\sin \psi_{kV} = X_k / Z_k$ při předávacím místě blízko transformátoru vn/nn je $\cong 1$.

Tab. 3-1 Vztažené hodnoty proudu pro harmonické u nn

řád harmonické v	Vztažný proud i_v : (A/MVA)
5	3.0
7	2.5
11	1.5
13	1.0

Pokud je společný napájecí bod (větrná elektrárna) v síti vn, tento postup výpočtu nemůže být použit. [10]

3.3.2 Výrobný v síti vn

Pro pouze jediné předávací místo v síti vn lze určit celkové v tomto bodě přípustné harmonické proudy ze vztažných proudů $i_{\mu\text{vpř}}$ z následující tabulky násobených zkratovým výkonem ve společném napájecím bodu

$$I_{\text{vpř}} = i_{\text{vpř}} \cdot S_{kV} \quad (3.10)$$

Za předpokladu, že je ve společném napájecím bodu připojeno několik zřízení, pak se harmonické proudy přípustné pro jednotlivá zařízení určí násobením poměru výkonu zařízení S_A k celkovému připojitelnému nebo plánovanému výkonu S_{AV} ve společném napájecím bodu.

$$I_{\text{vpř}} = i_{\text{vpř}} \cdot \frac{S_A}{S_{AV}} = i_{\text{vpř}} \cdot S_{kV} \cdot \frac{S_A}{S_{AV}} \quad (3.11)$$

Za S_A lze dosadit $\sum S_{nE}$ u zařízení sestávajících z jednotek stejného typu. To platí i pro větrné elektrárny. Pouze o odhad jde u zařízení nestejného typu. Pro síť vn jsou celkově přípustné harmonické proudy vztažené na zkratový výkon a jsou vyvolány zařízením připojeným přímo do této sítě. Pokud se nulová složka proudů z výroby neuzavírá do sítě, pak platí pro harmonické s řády násobků tří hodnoty v Tab. 3–2 pro nejbližší řád.

Tab. 3–2 Vztažné hodnoty proudu pro harmonické u vn [10]

Řád harmonické μ, ν	Přípustný vztažný proud harmonických $i_{\mu\text{vpř}}$ (A/MVA)		
	síť 10 kV	síť 22 kV	síť 35 kV
5	0,115	0,058	0,033
7	0,082	0,041	0,023
11	0,052	0,026	0,015
13	0,038	0,019	0,011
17	0,022	0,011	0,006
19	0,016	0,009	0,005
23	0,012	0,006	0,003
25	0,01	0,005	0,003
>25 nebo sudé	0,06/ μ	0,03/ μ	0,017/ μ
$\mu < 40$	0,06/ μ	0,03/ μ	0,017/ μ
$\mu > 40$	0,16/ μ	0,09/ μ	0,046/ μ

3.4 Ovlivnění zařízení HDO

Provoz zařízení hromadného dálkového zařízení (HDO) je obvykle s frekvencí v rozmezí 183,3 až 283,3 Hz. U PDS je třeba zjistit místně použitou frekvenci HDO. Obvyklá vysílací úroveň je 1,5 až 2,5 % U_n . Vysílače HDO jsou dimenzovány na zatížení, které do jisté míry vychází z 50 Hz zatížení sítě, kterou napájí svým signálem. Na přípojnici, do níž je vysílán signál HDO, jsou připojené výrobní. Tento signál je ovlivňován přídatným zatížením vysílačů HDO. Přídatné zatížení plyne z:

- vlastního zařízení výrobní
- zvýšeného zatížením sítě, které je v důsledku výroby k síti připojeno

Pro tyto případy se posuzuje vliv výrobní na zatížení HDO. Především se vychází z PDS o jeho zatížení a jmenovitém proudu. Vysílače do 110 kV a vn mají přípustné zvýšení zatížení 5 % jmenovitého proudu. Jestliže se připojuje výrobní k síti mimo přípojnici, do které se vysílá signál HDO, je možno maximálně o 5 % snížení úrovně signálu. A to jedině v případě, že bude dodržena minimální přípustná úroveň signálu HDO, která je určená měřením. I při mimořádných zapojeních sítí musí být tato úroveň zaručena. Minimální úrovně signálu HDO pro frekvence 194–283,3 Hz jsou:

- nn 150 % U_f
- vn 190 % U_f
- 110 kV 200 % U_f

U_f označuje náběhové napětí, jehož hodnota se obvykle pohybuje v rozmezí 0,8–0,9 U_n .

Odpovídajícími technickými opatřeními, zpravidla hradícími členy je potřeba zamezit nepřipustným změnám hladiny HDO v přípojném bodu. Technické parametry hradících členů musí být odsouhlaseny PDS.

Některé hlediska, která je třeba uvažovat při posuzování poklesů hladiny signálu HDO výrobními, jsou:

- Významné snížení hladiny signálu HDO není způsobeno zdroji, které jsou připojené statickými střídači bez filtrů. Jsou-li však vybaveny kompenzačními kondenzátory nebo filtry, je nutno přezkoušet sériovou rezonanci s reaktancí nakrátko transformátoru výrobní.
- Zdroje, jejichž asynchronní nebo synchronní generátory jsou připojeny do sítě přes transformátor, vyvolávají tím nižší pokles signálu, čím je vyšší zkratová reaktance transformátoru a generátoru, frekvence HDO a zkratový výkon sítě.

Mimo omezení poklesu hladiny signálu HDO také nesmí docházet k vytváření nežádoucích rušivých napětí. Platí:

- rušivé napětí vyvolané výrobní, jehož frekvence odpovídá místně použité frekvenci HDO, nebo se nachází v bezprostřední blízkosti, nesmí překročit 0,1 % U_n .
- výrobní produkovaná napětí, jejichž hodnota frekvence je do 100 Hz nad nebo pod místně použitou frekvencí HDO, nesmí v přípojném bodu překročit 0,3 % U_n .

Tyto hodnoty, které nesmí být překročeny, vychází z předpokladu, že nejsou v síti nn připojeny více než dvě vlastní výrobní. V opačném případě je zapotřebí zvláštních výpočtů.

Pokud je provoz zařízení HDO nepříznivě ovlivňován vlastní výrobou, je zapotřebí, aby její provozovatel učinil potřebná opatření k odstranění ovlivnění. A to i v tom případě, když je ovlivnění zjištěno v pozdějším čase. Nepřesáhne-li výkon v celé síťové oblasti a výkon v přípojném bodu hodnoty uvedené v Tab. 3–3, je možné připojit k síti výroby bez posouzení. [10]

Tab. 3–3 *Hodnoty výkonů připojitelných bez posouzení [10]*

Napěťová úroveň (kV)	Celkový výkon výrobních zařízení	
	V přípojném bodu	V síťové oblasti
0,4	10 kVA	20 kVA
VN	2 MVA	4 MVA
110	20 MVA	40 MVA

4 Obecné zásady při projektování kabelového vedení

Elektrické zařízení, které se navrhuje a připojuje do elektrizační soustavy, zahrnuje soubor potřebných úvah a rozhodnutí administrativních, technických a technicko-hospodářských. Při jejich úspěšném splnění lze dosáhnout efektivnosti ve využívání a zásobování elektrické energie. Úplný výčet celého postupu řešení není možné podat, lze však uvést hlavní hlediska, která jsou s návrhem spojená:

- proudové zatížení vodiče s ohledem na oteplení
- odolnost vůči zkratovým proudům
- úbytek napětí na vedení
- hospodárnost vedení
- mechanická pevnost
- bezpečnost provozu

4.1 Proudové zatížení vodiče s ohledem na oteplení

V elektrickém rozvodu se při projektování musí navrhnout maximální výpočtové zatížení, na které se bude vedení, zdroj napájení a jistící přístroje dimenzovat. Toto zatížení získáme součinem instalovaného výkonu daného spotřebiče a předpokládaného součinitele náročnosti.

$$P_p = P_i \cdot \beta \quad (kW) \quad (4.1)$$

Výpočtový proud, který vychází z výpočtového zatížení, se pro trojfázové spotřebiče dá spočítat podle vztahu:

$$I_p = \frac{1000 \cdot P_p}{\sqrt{3} \cdot U_s \cdot \cos \varphi} \quad (A) \quad (4.2)$$

- U_s sdružené napětí (V),
- $\cos \varphi$ účinník. [9]

Dovolený proud, na který se provádí dimenzování průřezu vodiče, vychází z dovoleného oteplení. Ke ztrátám a následnému vývinu tepla dochází při průchodu elektrického proudu vodičem. Teplo vyvinuté ve vodiči je přímo úměrné druhé mocnině protékajícího proudu a odporu vodiče. Toto teplo se musí v ustáleném stavu přenést povrchem vodiče do okolí.

4.1.1 Dovolená provozní teplota

Jedná se o nejvyšší navrženou teplotu, kterou udává výrobce. Při této teplotě může vodič trvale pracovat. Její velikost je závislá na materiálu izolace a jmenovitém napětí vodičů. Na mechanické vlastnosti a bezpečnost okolí (nebezpečí požáru) se musí dbát zejména u holých vodičů. Oteplení jádra nesmí být při zkratu a přetížení větší, než dovolená teplota při zkratu a dovolená teplota při přetížení. Vliv na teplotu vodiče má:

- proudové zatížení
- teplota okolí
- přímé sluneční záření (u venkovního vedení)

4.1.2 Dovolené proudové zatížení

Dovolené proudové zatížení, jinak řečeno dovolený proud, je hodnota střídavého nebo stejnosměrného proudu, kterým je zatěžování jádra vodiče nebo kabelu dovoleno. A to při daném způsobu uložení, daných provozních podmínkách a dané teplotě okolí tak, aby se nepřekročila jeho dovolená provozní teplota. Pomocí přepočítávacích činitelů proudové zatížitelnosti se dovolený proud zjišťuje výpočtem podle vztahu:

$$I_D = k_1 k_2 \dots k_i I_N \quad (4.3)$$

kde:

- $k_1, k_2, k_3, \dots, k_i$ jsou přepočítávací činitele proudové zatížitelnosti, které respektují určité odchylky od základních podmínek
- I_N je jmenovitý proud příslušného vodiče. [2]

4.2 Odolnost vůči zkratovým proudům

Vzniklá porucha na provozovaném vedení může způsobit zkrat. Tento zkrat je sice odpojen příslušným ochranným prvkem (jističem, pojistkou, jinou ochranou), ale po určitou krátkou dobu obvodem protéká zkratový proud. Ten bývá z pravidla mnohonásobně větší, než proud jmenovitý. Zkratový proud způsobuje dynamické a tepelné namáhání vodičů, kterým musí vedení odolat.

4.2.1 Tepelné účinky

Tepelné účinky zkratového proudu se nepříznivým způsobem projevují hlavně na izolaci vedení. Bývají tedy řešeny především u volně uložených a zavěšených izolovaných vodičů. Během krátké doby, po kterou zkrat působí, vznikne velké oteplení, které nemůže být odevzdáno do okolí. Tím se zvětšuje teplota samotného vodiče. Tepelné účinky zkratového proudu se posuzují podle ekvivalentního oteplovacího proudu.

Ekvivalentní oteplovací proud I_{ke}

Je efektivní hodnota fiktivního proudu sinusového průběhu s konstantní amplitudou, který za dobu trvání zkratu vyvine stejné množství tepla jako skutečný zkratový proud. Můžeme tedy zkratový proud nahradit ekvivalentním oteplovacím.

$$I_{ke} = k_e \cdot I_k'' \quad (kA; -, kA) \quad (4.4)$$

kde:

- k_e je činitel respektující místo zkratu a dobu trvání,
- I_k'' počáteční rázový zkratový proud. [12]

Pro minimální průřez vodiče s ohledem na tepelné účinky zkratového proudu platí vztah:

$$S_{MIN} = \frac{I_{ke} \cdot \sqrt{t_K}}{K} \quad (\text{mm}^2) \quad (4.5)$$

- I_{ke} ekvivalentní oteplovací proud (A),
- K koeficient, který respektuje teplotu jádra kabelu před a po zkratu,
- t_K doba trvání zkratu (s). [9]

4.2.2 Dynamické účinky

Působením proudů v sousedních vodičích vznikají dynamické síly. Tyto síly se sledují hlavně u pevně uložených vodičů, kdy dochází k velkému silovému namáhání jednotlivých prvků i upevnění. Proto je při návrhu vedení nárazový zkratový proud důležitou veličinou.

Nárazový zkratový proud I_{KM}

V podstatě je to první amplituda nesymetrického zkratového proudu po vzniku zkratu s maximální stejnosměrnou složkou.

Síla působící mezi dvěma rovnoběžnými vodiči vztažená na jeden metr vodiče se počítá dle vztahu:

$$F_K = k_1 \cdot k_2 \cdot 2 \cdot \frac{I_{KM}^2}{a} \cdot 10^{-7} \quad (N \cdot m^{-1}) \quad (4.6)$$

- k_1 koeficient tvaru vodiče (respektuje rozložení proudů),
- k_2 koeficient respektující uspořádání vodičů a fázový posuv proudů,
- I_{KM} nárazový zkratový proud (A),
- a vzdálenost vodičů [m]. [9]

V rozvodech může být velikost zkratových proudů výrazně ovlivněna jištěním. Proto se vyžaduje dimenzování jističích prvků takovým způsobem, aby došlo ke zrušení zkratového proudu dříve, než dosáhne své maximální možné hodnoty.

4.3 Úbytek napětí na vedení

Prochází-li kabelovým nebo venkovním vedením proud, dochází na tomto vedení k úbytku napětí. Proto musí být dimenzování vodičů a kabelů prováděno tak, aby při předpokládaném zatížení nezpůsobovaly úbytek napětí větší, než je dovolený. Jinými slovy na daném vedení nesmí vzniknout úbytek napětí větší, než je dovolená hodnota úbytku napětí. Překročením povolené meze by mohlo dojít k ovlivnění důležitých provozních vlastností spotřebičů (např. moment motoru). Technické normy pro danou oblast obsahují konkrétní požadavky na dovolený úbytek napětí. Odečtením hodnoty napětí na začátku vedení s hodnotou na konci vedení dostaneme výslednou hodnotu, která je rovna úbytku napětí.

$$\Delta U_f = R \cdot I \cdot \cos \varphi + X \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (4.7)$$

- ΔU_f hodnota fázového úbytku napětí (V),
- R činný odpor (Ω),
- X induktivní reaktance (Ω),
- I proud procházející vodičem (A). [3]

Při znalosti konfigurace příslušné sítě a výpočtového proudu daných spotřebičů je možno provést výpočet úbytku napětí podle vztahu (4.7). Při tomto výpočtu se musí uvažovat o respektování jednotlivých parametrů vedení. U většiny výpočtů jsou totiž některé z parametrů vedení zanedbány.

4.4 Hospodárnost vedení

Hospodárnost je hledisko, které má zajišťovat co nejnižší hodnotu celkových provozních a investičních nákladů vedení. Jinými slovy, čím menší průřez se použije, tím budou investiční náklady na vedení menší, ale na druhou stranu se zvětší náklady na provoz díky zvětšení jeho odporu a ztrát. Proto se hledá optimální průřez, kterému bude odpovídat minimum celkových nákladů, při předpokládané životnosti vedení a předpokládaném zatížení.

Měřením, nebo výpočtem se dají určit technické a ekonomické činitele (související s cenou použitého materiálu, cenou energie atd.).

Pro hospodárný průřez vodiče jedné fáze platí:

$$A = k I_p \sqrt{t_z} \quad (mm^2) \quad (4.8)$$

kde:

- k je součinitel mechanické pevnosti,
- I_p výpočtový proud (A),
- t_z doba plných ztrát za rok ($h \cdot r^{-1}$). [2]

V daném vodiči by se ztráty energie měly přibližovat určité hranici. Tato hranice se nazývá ztráty hospodárné a neměla by být překročena. Pak se pomocí diagramů a vzorců pro jednotlivá vedení kontroluje hospodárnost vodičů.

4.5 Mechanická pevnost

Při návrhu vodiče je mechanická pevnost jedním z dalších důležitých parametrů. Při montáži, nebo během provozu musí být vodiče pro elektrický rozvod schopny odolávat mechanickému namáhání. Tomuto namáhání je vystaveno zejména venkovní vedení, kde se mechanický výpočet nejčastěji provádí na hladinách vn a vvn. Pro elektrické vedení na těchto hladinách se počítá minimální průřez vodiče, kde se respektují povětrnostní vlivy (námraza, vítr), nebo jeho samotná hmotnost. Na venkovní a vnitřní vedení také působí mechanické namáhání zkratovými proudy, jak je pojednáno ve výše uvedené kapitole.

Návrh průřezu vodiče je prováděn tak, aby z hlediska mechanické pevnosti snesl největší možné namáhání, které v praxi může nastat. Pro jednotlivé druhy vedení, místo jejich použití a způsob uložení se stanoví minimální průřezy, které udává příslušná norma. [9]

4.6 Bezpečnost provozu

Umístění elektrického zařízení se provádí tak, aby nebylo ve své činnosti rušeno neoprávněnými zásahy a aby nebylo vystaveno vnějším účinkům, které by mohly zapříčinit jeho poruchy. Svým provozem a vnějšími účinky nesmí ohrožovat osoby, či jiná zařízení a to ani při mimořádných provozních stavech jako je přepětí, nebo zkrat. Dbá se tedy i na druh prostředí, ve kterém bude zařízení provozováno.

Ač je hledisko bezpečnosti provozu zařazeno k závěru této kapitoly, je hlavním hlediskem při projektování vedení. Bezpečnost provozu je podmíněna správnou funkcí ochran před nebezpečným dotykem.

Musí platit vztah pro impedanci zkratové smyčky:

$$Z_S \cdot I_A \leq U_0 \quad (4.9)$$

- Z_S impedance poruchové smyčky zahrnující zdroj, fázový vodič až k místu poruchy a ochranný vodič mezi místem poruchy a zdrojem (Ω)
- I_A proud zajišťující samočinné působení odporovacího ochranného prvku v době stanovené normou (A)
- U_0 jmenovité napětí proti zemi (V). [9]

Průřez vedení (ochranného i pracovního vodiče) je zapotřebí volit tak, aby impedance vypínací smyčky nepřekročila hodnotu, která vyplývá z podmínky pro vypnutí ochranného prvku v požadované době.

4.7 Jištění vedení

S výše uvedenou kapitolou souvisí jištění vedení, jenž je jedním z nejdůležitějších hledisek při projektování vedení. Hlavním úkolem jištění je zamezit především ohrožení lidí, škodám na výrobě a majetku, způsobené často nepředvídatelnými poruchovými stavy. Mezi poruchové stavy řadíme zejména přetížení, přepětí, zkraty atp.

Umístění jisticích přístrojů, které mají vedení chránit proti nadproudům, zkratu nebo přetížení, se provádí v místech, kde se zmenšuje dovolené zatížení vedení, nebo kde se zmenšuje průřez vedení a vždy také na začátku vedení. Požadavky, z nichž se vychází při jištění, jsou shrnuty do následujících bodů:

Při nadproudech způsobených přetížením se jádro jištěného vodiče či kabelu nesmí ohřát nad dovolenou hodnotu závislou na izolaci vodiče, dříve než je přetížení vypnuto.

- Při nadproudech způsobených zkraty se jádro jištěného vodiče či kabelu nesmí nebezpečně zahřát a nesmí překročit nejvyšší dovolenou teplotu, za dobu než je zkrat vypnut.
- Nesmí nastat při normálním bezporuchovém provozu nežádoucí působení jisticích přístrojů.
- Při svém působení mají jistící přístroje odpojit co nejmenší část elektrického rozvodu. [4]

4.7.1 Požadavky kladené na ochrany a jištění

Provozem energetické soustavy jsou na ochrany kladeny určité požadavky. Lze hodnotit jakost a vhodnost použití ochrany, podle toho jak ochrana tyto požadavky splňuje. Obecně se nadá stanovit, který z požadavků je důležitější než jiný. Záleží to na způsobu provozu, druhu chráněného objektu i na okolní soustavě.

Např. menší důraz na citlivost než na rychlost se klade při použití zkratové ochrany krátkého kabelu s velkými zkratovými proudy. Tyto zkratové proudy se vyznačují mnohem větší hodnotou, než proudy provozní. Proto se požaduje rychlé působení a vypnutí zkratu, aby nedošlo k poškození kabelu nebo jiného zařízení. Naopak je tomu u zemní ochrany. K odpojení postižené oblasti dojde až po zajištění náhradního napájení, popř. po odpojení podřadných zátěží, tudíž se rychlost nevyžaduje. Citlivost i na malé proudy je však nutná pro stanovení zemního spojení. Mezi nejdůležitější požadavky ochrany patří selektivita, spolehlivost a již

zmiňovaná citlivost a rychlost. [1]

Selektivita ochrany

Selektivita je hlavní schopností ochrany reagovat pouze na tu část soustavy, v níž porucha vznikla a odepnout ji nejbližšími vypínači soustavy tak, aby byl odpojen co nejmenší úsek energetické soustavy, ve kterém tato porucha nastala. Jinými slovy se snažíme, aby byl vypnut co nejmenší úsek, který je zasažen poruchou a co největší část nepoškozené soustavy zůstala v provozu. Tím se zmenší nebezpečí ztráty stability a zhroucení soustavy. Větší selektivity se dá dosáhnout buď časovým odstupňováním působení ochrany, nebo vysíláním blokovacích impulsů úseky, v nichž k poruše nedošlo.

Spolehlivost ochrany

Lze považovat za jednu z nejzákladnějších vlastností ochrany. Vznikne-li porucha, nesmí dojít k selhání ochrany. Naopak není-li na daném objektu porucha, ochrana nesmí samovolně působit. Větší spolehlivosti se dosahuje správnou montáží nebo konstrukční jednoduchostí. Platí pravidlo čím méně součástí, tím menší pravděpodobnost poruchy. Ochrany jsou dlouhou dobu v nečinném stavu, proto je důležité, aby se v periodických intervalech prováděly revize.

Citlivost ochrany

Ochrana se nastavuje na určitou velikost měřené veličiny, podle této veličiny pak dochází k vyhodnocení, jestli se jedná, nebo nejedná o poruchový stav. Bod, v němž dojde k sepnutí ochrany, je nastaven na nižší hodnotu, než je hodnota poruchového stavu. Tento bod se nastavuje zmiňovaným způsobem jak z hlediska bezpečnosti, tak z hlediska materiálních škod.

Rychlost ochrany

Rychlost ochrany je doba působení od vzniku poruchy do vypnutí vypínače. Je-li vysoká rychlost působení ochrany, snižují se nároky na dimenzování chráněného objektu. Akumulované teplo uvnitř zařízení je při zkratu přímo úměrné době trvání poruchy t_z . Chráněný objekt musí být na toto teplo dimenzován:

$$w = \int_0^{t_z} ri^2(t) dt \quad (4.10)$$

Při konstantním proudu poruchy:

$$w = \int_0^{t_z} ri^2 dt = ri^2 t_z = ri^2 \cdot (t_p + t_0) \quad (4.11)$$

kde:

- w je akumulovaná energie (teplo),
- t_z doba trvání poruchy,
- t_p doba působení ochrany,
- t_0 doba působení ovládacího zařízení (vypínače),
- r vnitřní odpor chráněného objektu,
- $i(t)$ proud při poruše. [1]

Rychlé vypnutí poruchy zvyšuje stabilitu soustavy a omezuje chod spotřebičů při sníženém napětí.

$$t_z = t_p + t_0 \quad (4.12)$$

Je nutné požadovat i rychlou funkci vypínačů a ostatního ovládání objektu. Celkovou dobu poruchy tedy dostaneme sečtením doby působení ochrany a doby ovládacího zařízení (vypínače). U některých ochran se požaduje, aby jejich působení bylo záměrně časově pozdě. Jedná se o krátkodobá přetížení, např. při spouštění motorů. [1]

4.7.2 Jištění vodičů pojistkami

Platí-li následující vztah pro dovolený zatěžovací proud vodiče, pak příslušná pojistka může tento vodič jistit proti nadproudům, přetížení i zkratům.

$$I \geq \frac{I_{np}}{k_p} \quad (A; A) \quad (4.13)$$

kde:

- I je dovolený proud příslušného druhu vodiče uloženého v prostředí o teplotě ϑ (°C),
- I_{np} jmenovitý proud pojistky,
- k_p součinitel přiřazení pojistky k vodiči, který je uložen v prostředí s teplotou ϑ (°C). [4]

Hodnoty součinitele k_p se udávají pro určitou teplotu prostředí a pro jednotlivé druhy vodičů. Jejich hodnota je většinou odečítána z grafických závislostí.

Aby pojistka správně fungovala, musí být hodnota skutečného trvalého zatížení vodiče menší, než jmenovitá hodnota použité pojistky. Základní úlohou pojistky nn je jistit vedení proti nadproudům při přetížení nebo zkratech a až po té mohou být jištěny spotřebiče a přístroje na konci vedení. Pojistkou se mohou jistit dva i více paralelních vodičů. V takovém případě hodnota součinitele k_p pro společnou pojistku má být menší, než by byla použita hodnota k_p pro chránění jednotlivého vodiče.

Pro jištění vodičů proti přetížení se nehodí pomalé pojistky. Naopak při jištění proti zkratu mohou jistit vodič dobře. Nevhodné použití pojistek je i tam, kde je jištěno zařízení s krátkodobým, či přerušovaným chodem nebo, zatížením. Pro takový případ se využívá jistící relé, nebo jistič. Jistící přístroje musí být nastaveny takovým způsobem, aby nedošlo k překročení dovolené teploty vodiče. [4]

4.7.3 Jištění vodičů jističi

Pro ochranu vedení proti přetížení pomocí jističů nebo jisticích relé stykačů se uplatňuje následující rovnice. V této rovnici je součinitel přiřazení roven jedné.

$$I = I_{nj} \quad (A; A) \quad (4.14)$$

kde:

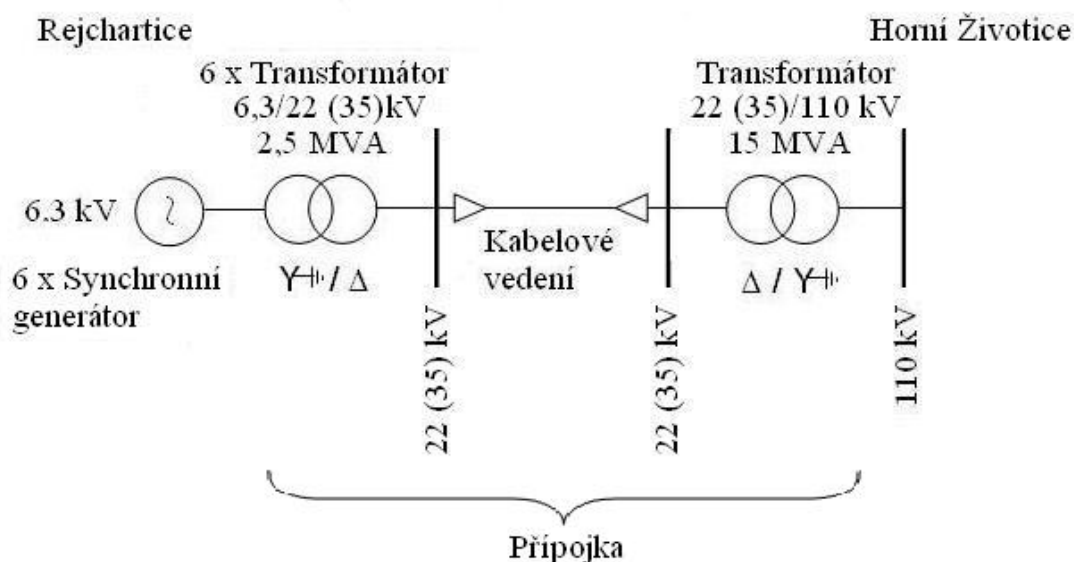
- I je dovolený proud příslušného druhu vodiče uloženého v prostředí o teplotě ϑ ($^{\circ}\text{C}$),
- I_{nj} je nastavení jističe nebo jisticího relé stykačů. [4]

K vodičům se jističe přiřazují obdobně jako pojistky, hlavním rozdílem je, že jističe mají delší vypínací časy. Při zkratu se tedy musí kontrolovat, aby nebyla překročena dovolená teplota vodiče za dobu, než je jističem zkrat vypnut. Podobně jako u pojistek se v první řadě jistí jističem dané vedení a až posléze mohou být jištěny spotřebiče, nebo stroje na konci vedení. Pokud vlastnosti spotřebiče na konci vodiče garantují, že vodič nemůže být přetížen nebo se vodič nemůže přetížit z důvodu jeho jištění na konci vedení, mohou za určitých podmínek jističe jistit vodič pouze proti zkratům.

Motory a spotřebiče podobného typu se jistí především za pomoci jisticích nadproudových relé a motorových jističů. Jejich funkce se s výhodou využívá i při jištění přívodního vedení. A to hlavně proto, že dané přetížení vypínají dříve, než jističe nebo pojistky vedení a tím nastane menší zvýšení teploty vodiče. [4]

5 Návrh přípojky na hladině 22 kV i 35 kV

Hlavní částí diplomové práce je návrh přípojky pro park větrných elektráren. Cílem je provést tento návrh jak pro napěťovou hladinu 22 kV, tak pro napěťovou hladinu 35 kV. Trasa vedení bude situována z parku větrných elektráren, které budou v oblasti Rejchartice, do rozvodny Horní Životice. Přípojka bude ukončena v nové trafostanici, která se napojí přímo do zmiňované rozvodny v Horních Živicích.



Obr. 5–1 Schéma navrhované přípojky

Vedení má být navrženo pro materiály z hliníkového a měděného jádra na obou napěťových hladinách. Vedení bude konstruováno kabelovým vedením, jelikož nadzemní vedení nebylo povoleno úřady.

5.1 Návrh přípojky na hladině 22 kV

Vstupní hodnoty dané zadavatelem:

Synchronní generátor 6 ks

- Jmenovité napětí 6,3 kV
- Jmenovitý činný výkon každého 2 MW
- Jmenovitý zdánlivý výkon 2,5 MVA
- Rázová reaktance 12,5 %

Transformátor 6,3/22 kV 6 ks

- Jmenovité napětí nakrátko 5,9 %
- Jmenovitý zdánlivý výkon 2,5 MVA
- Ztráty naprázdno 1,92 kW
- Ztráty nakrátko 24 kW

Transformátor 22/110 kV

- Jmenovité napětí nakrátko 10,5 %
- Jmenovitý zdánlivý výkon 15 MVA
- Ztráty naprázdno 9,6 kW
- Ztráty nakrátko 120 kW

Uvažovaný účinník při výpočtech

- $\cos \varphi = 0,95 \Rightarrow \sin \varphi = 0,312$

Celková délka kabelového vedení

- $l = 25\,342\text{ m}$

Zkratový výkon v místě připojení Horní Životice na hladině 110 kV

- trojfázový $S''_{k3} = 7621\text{ MVA}$

5.1.1 Výpočet velikosti instalovaných výkonů transformátorů

Výpočtový výkon P_p pro 6 generátorů:

$$P_p = 2\text{ MW} \cdot 6 = 12\text{ MW}$$

Pro výpočet instalovaného zdánlivého výkonu transformátoru se může použít následující vztah.

$$S_T = \frac{P_p}{\gamma \cdot \cos \varphi} \quad (\text{VA})$$

kde:

- P_p je výpočtový výkon (W),
- $\cos \varphi$ účinník,
- γ koeficient využití. [15]

Zadavatel určil, aby instalovaný výkon byl 85 % výkonu transformátoru, protože při této hodnotě je dosahováno jeho největší účinnosti. Z toho plyne, že koeficient využití transformátoru je $\gamma = 0,85$.

a) Instalovaný výkon transformátoru 6,3/22 kV:

$$S_T = \frac{P_p}{\gamma \cdot \cos \varphi} = \frac{2 \cdot 10^6}{0,85 \cdot 0,95} = 2,476\text{ MVA} \Rightarrow 2,5\text{ MVA}$$

Skutečný součinitel využití transformátoru:

$$\gamma_s = \frac{P_p}{S_n \cdot \cos \varphi} = \frac{2 \cdot 10^6}{2,5 \cdot 10^6 \cdot 0,95} = 0,842$$

b) Instalovaný výkon transformátoru 22/110 kV:

$$S_T = \frac{P_P}{\gamma \cdot \cos \varphi} = \frac{12 \cdot 10^6}{0,85 \cdot 0,95} = 14,86 \text{ MVA} \Rightarrow 15 \text{ MVA}$$

Skutečný součinitel využití transformátoru:

$$\gamma_s = \frac{P_P}{S_n \cdot \cos \varphi} = \frac{12 \cdot 10^6}{15 \cdot 10^6 \cdot 0,95} = 0,842$$

Skutečná hodnota koeficientu využití transformátoru má být nižší než zadaná. Navržené transformátory vyhovují, neboť je splněna podmínka $\gamma \geq \gamma_s$. Ostatní hodnoty transformátorů potřebné k dalším výpočtům byly poskytnuty zadavatelem. Jedná se o nízkoztrátové transformátory.

5.1.2 Výpočtový proud

Velikost výpočtového proudu pro návrh vedení vn se vypočítá podle vztahu (4.2):

$$I_P = \frac{P_P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi} = \frac{12 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 0,95} = 331,5 \text{ A}$$

5.1.3 Návrh a dimenzování vedení na hladině 22 kV – jádro Cu

a) Výpočet průřezu vodiče

Dovolený úbytek napětí:

$$\Delta u_{dov} = \frac{5}{100} \cdot 22 \cdot 10^3 = 1100 \text{ V}$$

Výpočet průřezu pro třífázový obvod lze provést podle následujícího vztahu. [12]

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot l \cdot I_{\check{c}} \cdot \rho}{\Delta u_{dov} - \sqrt{3} \cdot X_k \cdot l \cdot I_j} \quad (\text{mm}^2)$$

- l délka vedení (m),
- Δu_{dov} dovozený úbytek napětí (V),
- $I_{\check{c}}$ činný proud (A),
- I_j jalový proud (A),
- X_k induktivní reaktance (Ω),
- ρ měrný elektrický odpor mědi ($\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$). [12]

Z výpočtového výkonu se můžou spočítat hodnoty činného a jalového proudu dle [12].

$$I_{\check{c}} = \frac{P_P}{\sqrt{3} \cdot U_s} = \frac{12 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3} = 314,9 \text{ A}$$

$$I_j = I_{\check{c}} \cdot \tan \varphi = 103,5 \text{ A}$$

Pro měrný odpor mědi platí:

$$\rho = \frac{1}{57} \quad (\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1})$$

Hodnota induktivní reaktance X_k se při změně průřezu kabelu mění pouze nepatrně a proto její hodnota může být v určitém rozsahu považována za konstantní.

Po dosazení známých hodnot do vzorce se dostane výsledný průřez vodiče:

$$S_{Cu} = \frac{\sqrt{3} \cdot l \cdot I_{\varepsilon} \cdot \rho}{\Delta u_{dov} - \sqrt{3} \cdot X_k \cdot l \cdot I_j} =$$

$$= \frac{1}{57} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 25342 \cdot 331,5 \cdot 0,95}{1100 - \sqrt{3} \cdot 0,0801 \cdot 25,342 \cdot 103,5} = 329,4 \Rightarrow \underline{\underline{2 \times 240 \text{ mm}^2}}$$

Jednožilové kabelové vedení o průřezu 400 mm^2 by mohlo být těžko dostupné. A proto volím dvě paralelní jednožilové vedení $2 \times 3 \times 22 \text{ CXEKVCEY } 1 \times 240 \text{ mm}^2$ od firmy DRAKA [13]. Pro napětíovou hladinu 22 kV a měděné jádro. Hlavní parametry kabelu určené výrobcem:

- $S = 240 \text{ mm}^2$
- $R_k = 0,0754 \text{ } \Omega / \text{km}$ (při teplotě 20°C)
- $L_k = 0,51 \text{ mH} / \text{km}$ (v rovině)
- $I'_{k\max} = 37,7 \text{ kA/s}$
- $I_{dov} = 485 \text{ A}$ (při 65°C)

b) Dimenzování vodiče podle dovoleného úbytku napětí

Úbytek napětí na vodiči se bude počítat podle vztahu (4.7). Vypočítaná hodnota by neměla překročit hodnotu dovoleného úbytku. V tomto případě je přípustný celkový pokles napětí až 5 % jmenovité hodnoty napětí.

Přepočtené parametry z katalogu:

Činný odpor je nutno přepočítat dle následujícího vzorce na provozní teplotu vodiče, při níž bude vodič možno provozovat. Hodnota teplotního součinitele α pro měď i hliník je 0,004.

$$R_{k65} = R_{k20} \cdot (1 + \alpha \cdot (\Delta v)) =$$

$$= 0,0754 \cdot (1 + 0,004 \cdot (65 - 20)) = 0,08897 \text{ } \Omega / \text{km}$$

Výpočet induktivní reaktance z katalogové hodnoty indukčnosti.

$$X_k = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 0,51 \text{ mH} / \text{km} = 0,1602 \text{ } \Omega / \text{km}$$

Protože se jedná o dvě paralelní vedení, hodnota činného odporu a induktivní reaktance bude v následujícím vztahu pro výpočet úbytku napětí poloviční. Po dosazení se spočítá jednofázový úbytek:

$$\Delta U_f = R_k \cdot l \cdot I_p \cdot \cos \varphi + X_k \cdot l \cdot I_p \cdot \sin \varphi =$$

$$= 0,0445 \cdot 25,342 \cdot 331,5 \cdot 0,95 + 0,0801 \cdot 25,342 \cdot 331,5 \cdot 0,312 = 565,1 \text{ V}$$

Vyjádření procentního úbytku napětí vztaženého ke jmenovitému napětí:

$$\Delta u_{3f} \% = \frac{\sqrt{3} \cdot \Delta U_f}{U_n} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot 565,1}{22 \cdot 10^3} \cdot 100 = 4,45 \%$$

Tento kabel z hlediska dovoleného úbytku vyhovuje, neboť úbytek je menší než 5 %.

c) Dimenzování průřezu vodiče s ohledem na hospodárnost

V tomto hledisku se nebude vycházet ze vzorce podle vztahu (4.8), ale podle standardů ČEZ a.s., v nichž je uvedeno, že v základním provozním stavu by zatížení kabelu vn nemělo překročit 50 % jmenovité hodnoty proudu I_p .

Dovolená zatížitelnost kabelu I_{dov} se rovná jmenovité hodnotě proudu I_n kabelu. Vznikne jednoduchý vztah:

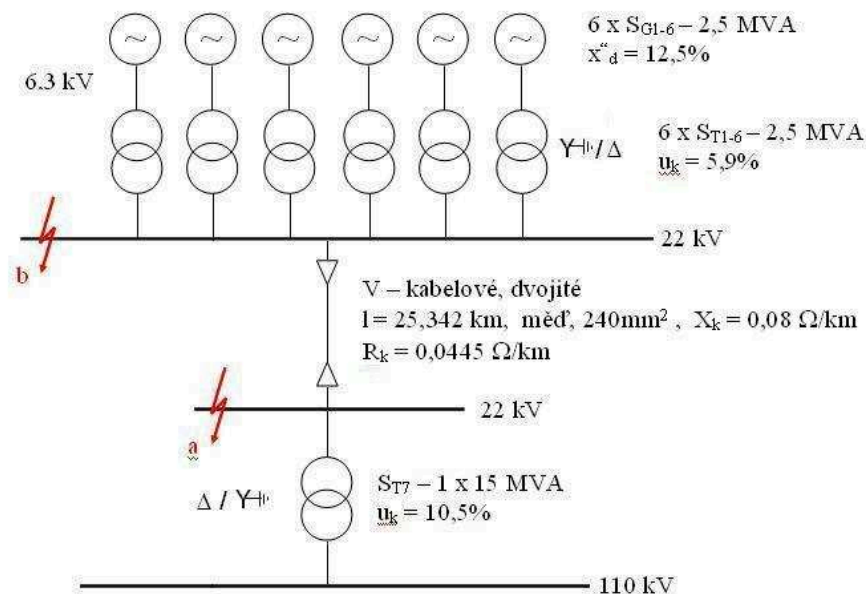
$$\text{Zatížení \%} = \frac{I_p}{I_{dov}} \cdot 100 = \frac{165,8}{485} \cdot 100 = 34,2 \%$$

Výpočtový proud je zde nutno podělit dvěma, protože se jedná o dvě paralelní vedení. Vodič vyhovuje, neboť jeho zatížení je menší než 50 %.

d) Dimenzování průřezu vodiče dle tepelných účinků zkratového proudu

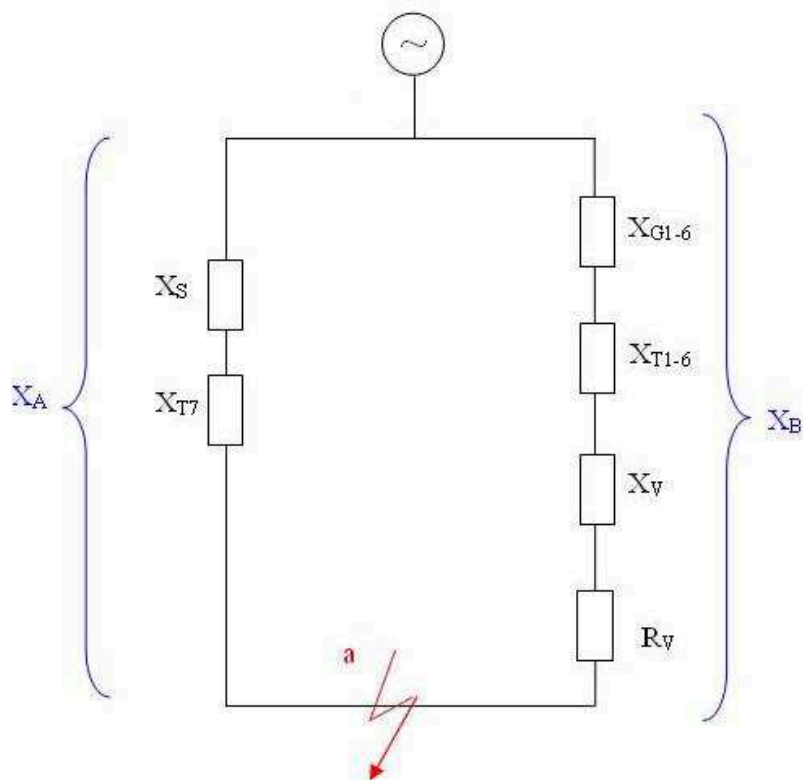
Zde je v první řadě nutno sestavit náhradní schéma soustavy pro souslednou, příp. i nulovou složku. Poté stanovit hodnoty impedance všech prvků v náhradním schématu. A z nich určit výslednou impedanci náhradního schématu ve zkratovém obvodu k místu zkratu. Z výsledné hodnoty je možné vypočítat zkratové poměry. V této části jsou vzorečky pro výpočty čerpány ze zdroje [12].

Zjednodušené schéma zapojení sítě:



Obr. 5-2 Schéma zapojení přípojky

Náhradní schéma sítě pro zkrat v bodě „a“:



Obr. 5–3 Náhradní schéma pro souslednou složku

Výpočet reaktance X_A :

Pro výpočet reaktance soustavy a počátečního rázového zkratového proudu je nutné zjistit hodnotu napěťového činitele pro příslušnou napěťovou hladinu. Připojení soustavy je provedeno na hladině 110 kV, proto je z následující tabulky vybrána hodnota napěťového činitele $c = 1,1$.

Tab. 5–1 Tabulka napěťových činitelů c [12]

Zkrat v soustavě	c_{\max}	c_{\min}
nn	1,00	0,95
vn, 110 kV, 220 kV	1,10	1,00
400 kV, 750 kV	1,05	1,00

Reaktance soustavy:

$$X'_S = \frac{c \cdot U_n^2}{S_{k3}''} = \frac{1,1 \cdot 110000^2}{7621} = 1,746 \, \Omega$$

$$X_S = X'_S \cdot \left(\frac{U_V}{U} \right)^2 = 1,746 \cdot \left(\frac{22}{110} \right)^2 = 0,07 \, \Omega$$

Reaktance transformátoru T7:

$$X'_{T7} = \frac{u_K \cdot U_{nT}^2}{100 \cdot S_{nT}} = \frac{10,5 \cdot 110000^2}{100 \cdot 15 \cdot 10^6} = 84,17 \, \Omega$$

$$X_{T7} = X'_{T7} \cdot \left(\frac{U_V}{U} \right)^2 = 84,17 \cdot \left(\frac{22}{110} \right)^2 = 3,388 \, \Omega$$

Hodnota reaktance X_A je:

$$X_A = X_S + X_{T7} = j0,07 + j3,388 = \underline{j3,458 \, \Omega}$$

Výpočet reaktance X_B :

Výpočet reaktance generátorů:

$$X'_{G1-6} = \frac{1}{6} \cdot \frac{x_d'' \cdot U_n^2}{100 \cdot S_{nG}} = \frac{1}{6} \cdot \frac{12 \cdot 6300^2}{100 \cdot 2,2 \cdot 10^6} = 0,331 \, \Omega$$

$$X_{G1-6} = X'_{G1-6} \cdot \left(\frac{U_V}{U} \right)^2 = 0,361 \cdot \left(\frac{22}{6,3} \right)^2 = 4,033 \, \Omega$$

Výpočet reaktance transformátorů T1 až T6

$$X'_{T1-6} = \frac{1}{6} \cdot \frac{u_K \cdot U_n^2}{100 \cdot S_{nT}} = \frac{1}{6} \cdot \frac{5,9 \cdot 6300^2}{100 \cdot 2,5 \cdot 10^6} = 0,156 \, \Omega$$

$$X_{T1-6} = X'_{T1-6} \cdot \left(\frac{U_V}{U} \right)^2 = 0,156 \cdot \left(\frac{22}{6,3} \right)^2 = 1,904 \, \Omega$$

Reaktance vedení:

$$X_V = X_K \cdot l = 0,08 \cdot 25,342 = 2,027 \, \Omega$$

Rezistance vedení:

$$R_V = R_K \cdot l = 0,0445 \cdot 25,342 = 1,128 \, \Omega$$

Hodnota reaktance X_B :

$$\begin{aligned} X_B &= X_{G1-6} + X_{T1-6} + X_V + R_V = \\ &= j4,033 + j1,904 + j2,027 + 1,128 = \underline{j7,964 \, \Omega} \end{aligned}$$

Výpočet celkové impedance:

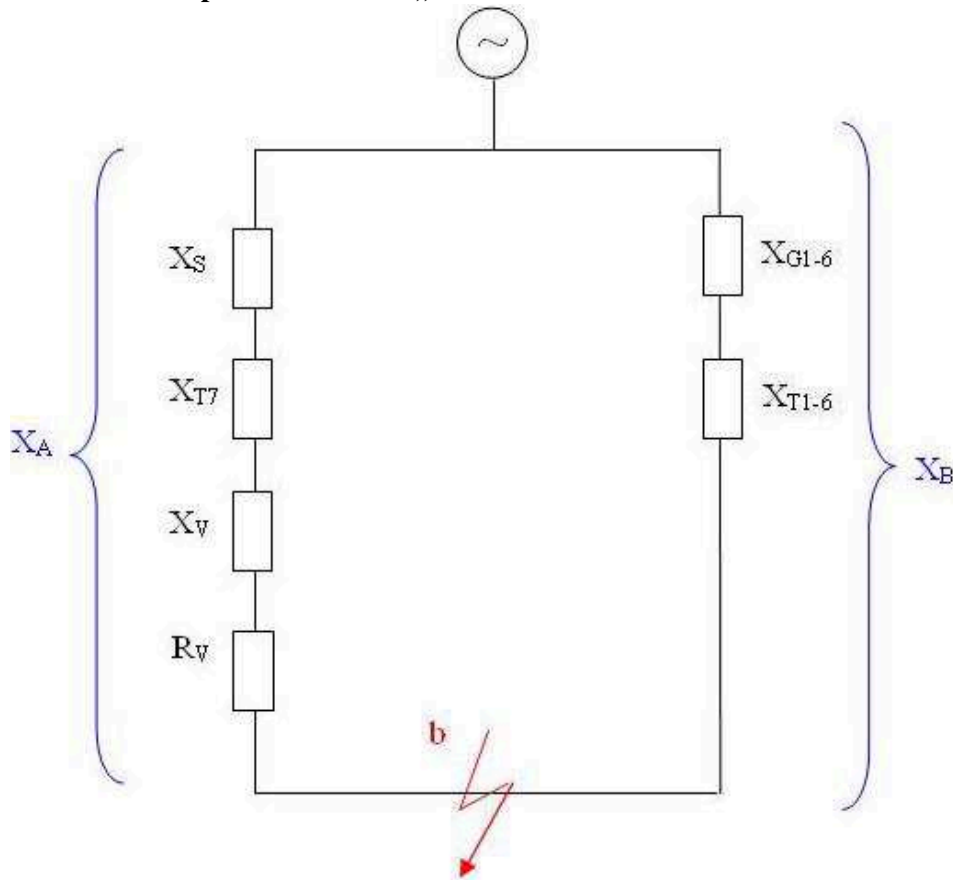
$$\frac{1}{Z_{(1)}} = \frac{1}{X_A} + \frac{1}{X_B} = \frac{1}{j3,458} + \frac{1}{1,128 + j7,964} \Rightarrow Z_{(1)} = 0,102 + j2,421 \Omega$$

$$|Z_{(1)}| = \sqrt{0,102^2 + 2,421^2} = \underline{2,423 \Omega}$$

Počáteční rázový zkratový proud pro trojfázový zkrat v místě „a“:

$$\underline{Ik_3''} = \frac{c \cdot Un}{\sqrt{3} \cdot |Z_{(1)}|} = \frac{1,1 \cdot 22 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 2,423} = \underline{5,766 \text{ kA}}$$

Náhradní schéma sítě pro zkrat v bodě „b“:



Obr. 5–4 Náhradní schéma pro souslednou složku

Hodnota reaktance X_A:

$$X_A = X_{G1-6} + X_{T1-6} = j4,033 + j1,904 = \underline{j5,937 \Omega}$$

Hodnota reaktance X_B:

$$X_B = X_S + X_{T7} + X_V + R_V = j0,07 + j3,388 + j2,027 + 1,128 = \underline{1,128 + j5,485 \Omega}$$

Výpočet celkové impedance:

$$\frac{1}{Z_{(1)}} = \frac{1}{X_A} + \frac{1}{X_B} = \frac{1}{1,128 + j5,485} + \frac{1}{j5,937} \Rightarrow Z_{(1)} = 0,302 + j2,881 \Omega$$

$$|Z_{(1)}| = \sqrt{0,302^2 + 2,881^2} = \underline{2,897 \Omega}$$

Počáteční rázový zkratový proud pro trojfázový zkrat v místě „b“:

$$\underline{Ik_3''} = \frac{c \cdot Un}{\sqrt{3} \cdot |Z_{(1)}|} = \frac{1,1 \cdot 22 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 2,897} = \underline{4,823 kA}$$

Z těchto výpočtů je vidět, že hodnota počátečního rázového zkratového proudu je pro zkrat v místě „a“ větší. Pro další varianty bude tedy počítán zkrat v místě „a“, jelikož se jedná o horší případ zkratu.

Ekvivalentní oteplovací proud:

Ekvivalentní oteplovací proud se vypočte dle vztahu (4.4). Pro místo zkratu za transformátorem v_{vn}/v_n a dobu trvání zkratu 0,5 s je součinitel pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu k_e vyčtený z tabulek 1,04. Použijeme zkratový proud v místě „a“ z výše uvedeného důvodu.

$$I_{ke} = k_e \cdot I_k'' = 1,04 \cdot 5766 = 5996,6 \text{ A}$$

Minimální zkratový průřez:

Výpočet minimálního zkratového průřezu vodiče se provede podle vzorce (4.5). Hodnota koeficientu K je 115 pro měděné jádro a kabel s PVC izolací. V našem případě se tato hodnota může využít.

$$S_{MIN} = \frac{I_{ke} \cdot \sqrt{t_k}}{K} = \frac{5996,6 \cdot \sqrt{0,5}}{115} = 36,9 \text{ mm}^2$$

Podmínka $S_{MIN} \leq S$, tedy $36,9 \leq 240$ je splněna.

Navržené paralelní kabelové vedení od firmy DRAKA s označením 2 x 3x22 CXEKVCEY 1x240 mm² vyhovuje všem podmínkám.

5.1.4 Výpočet ztrát**a) Výpočet činných ztrát pro zvolené kabelové vedení:**

$$\Delta P = 3 \cdot R \cdot I^2$$

- ΔP činné ztráty vývodu [W],
- R činný odpor celého vývodu [Ω],
- I proud vývodu [A]. [3]

Zde je si nutno připomenout, že $R = R_k \cdot l$. Zároveň se jedná o dvě paralelní vedení, tudíž hodnota R_k bude poloviční. Může se tedy dosadit:

$$\Delta P_{22Cu} = 3 \cdot 0,0445 \cdot 25,342 \cdot 331,5^2 = 371,8 \text{ kW}$$

b) Výpočet činných ztrát transformátorů:

$$\Delta P_T = \Delta P_0 + \left(\frac{S}{S_N} \right)^2 \cdot \Delta P_{KN}$$

- ΔP_T činné ztráty transformátoru [kW],
- ΔP_0 činné ztráty transformátoru naprázdno [kW],
- ΔP_{KN} činné ztráty jmenovité transformátoru nakrátko [kW],
- S_N jmenovitý výkon transformátoru [kVA],
- S skutečné zatížení (výkon) transformátoru [kVA]. [3]

Výpočet činných ztrát transformátorů 2,5 MVA s převodem 6,3/22 kV:

$$\Delta P_T = 1,92 \cdot 10^3 + \left(\frac{2,106 \cdot 10^6}{2,5 \cdot 10^6} \right)^2 \cdot 24 \cdot 10^3 = 18,952 \text{ kW}$$

Bude se jednat o šest transformátorů tohoto typu, ke každému generátoru jeden. Je tedy nutné pro výpočet celkových ztrát výsledek vynásobit šesti. Hodnota pro šest transformátorů:

$$\Delta P_{T1-6} = 6 \cdot \Delta P_T = 6 \cdot 18,952 = 113,72 \text{ kW}$$

Výpočet činných ztrát transformátoru 15 MVA s převodem 22/110 kV:

$$\Delta P_{T7} = 9,6 \cdot 10^3 + \left(\frac{12,64 \cdot 10^6}{15 \cdot 10^6} \right)^2 \cdot 120 \cdot 10^3 = 94,81 \text{ kW}$$

c) Celkové ztráty přípojky:

Pro celkové ztráty přípojky na 22 kV a měděné jádro vedení můžeme napsat:

$$\Delta P_{Celkové} = \Delta P_{22Cu} + \Delta P_{T1-6} + \Delta P_{T7} = 371,8 + 113,72 + 94,81 = 580,33 \text{ kW}$$

5.1.5 Návrh a dimenzování vedení na hladině 22 kV – jádro Al

a) Výpočet průřezu vodiče

Dovolený úbytek napětí bude stejný, taktéž hodnota činného a jalového proudu.

Pro měrný odpor hliníku platí:

$$\rho = \frac{1}{33} \quad (\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1})$$

Hodnota induktivní reaktance X_k se při změně průřezu kabelu mění pouze nepatrně a proto její hodnota může být v určitém rozsahu považována za konstantní.

Po dosazení známých hodnot do vzorce se dostane výsledný průřez vodiče:

$$S_{Al} = \frac{\sqrt{3} \cdot l \cdot I_{\epsilon} \cdot \rho}{\Delta u_{dov} - \sqrt{3} \cdot X_k \cdot l \cdot I_j} =$$

$$= \frac{1}{33} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 25342 \cdot 331,5 \cdot 0,95}{1100 - \sqrt{3} \cdot 0,0817 \cdot 25,342 \cdot 103,5} = 574,5 \Rightarrow 2 \times 400 \text{ mm}^2$$

Zde je možno použít paralelní kabel 2 x 3x22 – AXEKVCEY 12,7/22 (25) kV 1x400

Průřez takových rozměrů by mohlo být problematické sehnat, proto je proveden přepočet na nižší hodnotu, která je standardně dodávána.

$$S_{Al} = \frac{\sqrt{3} \cdot l \cdot I_{\epsilon} \cdot \rho}{\Delta u_{dov} - \sqrt{3} \cdot X_k \cdot l \cdot I_j} =$$

$$= \frac{1}{33} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 25342 \cdot 331,5 \cdot 0,95}{1100 - \sqrt{3} \cdot 0,05655 \cdot 25,342 \cdot 103,5} = 496,8 \Rightarrow \underline{\underline{3 \times 240 \text{ mm}^2}}$$

Průřez jednožilového kabelového vedení 500 mm² se standardně nevyrábí, a proto volím třikrát paralelní jednožilové vedení 3 x 3x22 AXEKVCEY 1 x 240 mm² od firmy DRAKA [13]. Pro napěťovou hladinu 22 kV a jádro z hliníku. Hlavní parametry kabelu určené výrobcem:

- S= 240 mm²
- R_k= 0,125 Ω / km (při teplotě 20°C)
- L_k= 0,54 mH / km (v rovině)
- I' _{kmax}= 25 kA/1s
- I_{dov}= 385 A (při 65°C)

b) Dimenzování vodiče podle dovoleného úbytku napětí

Úbytek napětí na vodiči se bude počítat podle vztahu (4.7). Vypočítaná hodnota by neměla překročit hodnotu dovoleného úbytku. V tomto případě je přípustný celkový pokles napětí až 5 % jmenovité hodnoty napětí.

Přepočtené parametry z katalogu:

Činný odpor je nutno přepočítat dle následujícího vzorce na provozní teplotu vodiče, při níž bude vodič možno provozovat. Hodnota teplotního součinitele α pro měď i hliník je 0,004.

$$R_{k65} = R_{k20} \cdot (1 + \alpha \cdot (\Delta v)) =$$

$$= 0,125 \cdot (1 + 0,004 \cdot (65 - 20)) = 0,1475 \text{ } \Omega / \text{ km}$$

Výpočet indukční reaktance z katalogové hodnoty indukčnosti.

$$X_k = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 0,54 \text{ mH / km} = 0,1696 \text{ } \Omega / \text{ km}$$

Protože se jedná o tři paralelní vedení, hodnota činného odporu a indukční reaktance bude v následujícím vztahu pro výpočet úbytku napětí menší o jednu třetinu. Po dosazení se spočítá jednofázový úbytek:

$$\Delta U_f = R_k \cdot l \cdot I_p \cdot \cos \varphi + X_k \cdot l \cdot I_p \cdot \sin \varphi =$$

$$= 0,04917 \cdot 25,342 \cdot 331,5 \cdot 0,95 + 0,05655 \cdot 25,342 \cdot 331,5 \cdot 0,312 = 540,7 \text{ V}$$

Vyjádření procentního úbytku napětí vztaheného ke jmenovitému napětí:

$$\Delta u_{3f} \% = \frac{\sqrt{3} \cdot \Delta U_f}{U_n} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot 540,7}{22 \cdot 10^3} \cdot 100 = 4,26\%$$

Tento kabel z hlediska dovoleného úbytku vyhovuje, neboť úbytek je menší než 5 %.

c) Dimenzování průřezu vodiče s ohledem na hospodárnost

V tomto hledisku se nebude vycházet ze vzorce podle vztahu (4.8), ale podle standardů ČEZ a.s., v nichž je uvedeno, že v základním provozním stavu by zatížení kabelu vn nemělo překročit 50 % jmenovité hodnoty proudu I_p .

Dovolená zatížitelnost kabelu I_{dov} se rovná jmenovité hodnotě proudu I_n kabelu. Hodnota výpočtového proudu I_p bude o jednu třetinu menší, jedná se o tři paralelní vedení. Vznikne jednoduchý vztah:

$$Zatížení \% = \frac{I_p}{I_{dov}} \cdot 100 = \frac{110,5}{385} \cdot 100 = 28,7 \%$$

Vodič vyhovuje, neboť jeho zatížení je menší než 50 %.

d) Dimenzování průřezu vodiče dle tepelných účinků zkratového proudu

V tomto bodě budou schémata i postup stejný. Jediný rozdíl bude v parametrech vedení.

Výpočet reaktance X_A :

Pro výpočet reaktance soustavy a počátečního rázového zkratového proudu je nutné zjistit hodnotu napěťového činitele pro příslušnou napěťovou hladinu. Opět hodnotu nalezneme v tabulce 5–1.

Reaktance soustavy:

$$X'_S = \frac{c \cdot U_n^2}{S''_{k3}} = \frac{1,1 \cdot 110000^2}{7621} = 1,746 \Omega$$

$$X_S = X'_S \cdot \left(\frac{U_V}{U} \right)^2 = 1,746 \cdot \left(\frac{22}{110} \right)^2 = 0,07 \Omega$$

Reaktance transformátoru T7:

$$X'_{T7} = \frac{u_K \cdot U_{nT}^2}{100 \cdot S_{nT}} = \frac{10,5 \cdot 110000^2}{100 \cdot 15 \cdot 10^6} = 84,17 \Omega$$

$$X_{T7} = X'_{T7} \cdot \left(\frac{U_V}{U} \right)^2 = 84,17 \cdot \left(\frac{22}{110} \right)^2 = 3,388 \Omega$$

Hodnota reaktance X_A je:

$$X_A = X_S + X_{T7} = j0,07 + j3,388 = \underline{j3,458 \Omega}$$

Výpočet reaktance X_B :

Výpočet reaktance generátorů:

$$X'_{G1-6} = \frac{1}{6} \cdot \frac{x_d'' \cdot U_n^2}{100 \cdot S_{nG}} = \frac{1}{6} \cdot \frac{12 \cdot 6300^2}{100 \cdot 2,2 \cdot 10^6} = 0,331 \Omega$$

$$X_{G1-6} = X'_{G1-6} \cdot \left(\frac{U_V}{U} \right)^2 = 0,361 \cdot \left(\frac{22}{6,3} \right)^2 = 4,033 \Omega$$

Výpočet reaktance transformátorů T1 až T6

$$X'_{T1-6} = \frac{1}{6} \cdot \frac{u_k \cdot U_n^2}{100 \cdot S_{nT}} = \frac{1}{6} \cdot \frac{5,9 \cdot 6300^2}{100 \cdot 2,5 \cdot 10^6} = 0,156 \Omega$$

$$X_{T1-6} = X'_{T1-6} \cdot \left(\frac{U_V}{U} \right)^2 = 0,156 \cdot \left(\frac{22}{6,3} \right)^2 = 1,904 \Omega$$

Reaktance vedení:

$$X_V = X_K \cdot l = 0,05655 \cdot 25,342 = 1,433 \Omega$$

Rezistance vedení:

$$R_V = R_K \cdot l = 0,04917 \cdot 25,342 = 1,246 \Omega$$

Hodnota reaktance X_B :

$$\begin{aligned} X_B &= X_{G1-6} + X_{T1-6} + X_V + R_V = \\ &= j4,033 + j1,904 + j1,433 + 1,246 = \underline{1,246 + j7,37 \Omega} \end{aligned}$$

Výpočet celkové impedance:

$$\begin{aligned} \frac{1}{Z_{(1)}} &= \frac{1}{X_A} + \frac{1}{X_B} = \frac{1}{j3,458} + \frac{1}{1,246 + j7,37} \Rightarrow Z_{(1)} = 0,125 + j2,368 \Omega \\ |Z_{(1)}| &= \sqrt{0,125^2 + 2,368^2} = \underline{2,371 \Omega} \end{aligned}$$

Počáteční rázový zkratový proud pro trojfázový zkrat v místě „a“:

$$\underline{Ik_3''} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_{(1)}|} = \frac{1,1 \cdot 22 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 2,371} = \underline{5,892 \text{ kA}}$$

Ekvivalentní oteplovací proud:

Ekvivalentní oteplovací proud se vypočte dle vztahu (4.4). Pro místo zkratu za transformátorem v_{vn}/v_n a dobu trvání zkratu 0,5 s je součinitel pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu k_e vyčtený z tabulek 1,04. Použijeme zkratový proud v místě „a“ z výše uvedeného důvodu.

$$I_{ke} = k_e \cdot I_k'' = 1,04 \cdot 5892 = 6127,7 \text{ A}$$

Minimální zkratový průřez:

Výpočet minimálního zkratového průřezu vodiče se provede podle vzorce (4.5). Hodnota koeficientu K je 74 pro hliníkové jádro a kabel s PVC izolací. V našem případě se tato hodnota může využít.

$$S_{MIN} = \frac{I_{ke} \cdot \sqrt{t_k}}{K} = \frac{6127,7 \cdot \sqrt{0,5}}{74} = 58,6 \text{ mm}^2$$

Podmínka $S_{MIN} \leq S$, tedy $58,6 \leq 240$ je splněna.

Navržené paralelní kabelové vedení od firmy DRAKA s označením 3 x 3x22 AXEKVCEY 1x240 mm² vyhovuje všem podmínkám.

5.1.6 Výpočet ztrát**a) Výpočet činných ztrát pro zvolené kabelové vedení:**

Jedná se o tři paralelní vedení tudíž hodnota R_k bude o jednu třetinu menší. Může se tedy dosadit:

$$\Delta P_{22Al} = 3 \cdot 0,04917 \cdot 25,342 \cdot 331,5^2 = 410,8 \text{ kW}$$

b) Výpočet činných ztrát transformátorů:

Výpočty ztrát transformátorů budou stejné, protože se v zapojení změnil pouze typ vedení.

c) Celkové ztráty přípojky:

Pro celkové ztráty přípojky na 22 kV a hliníkové jádro vedení můžeme napsat:

$$\Delta P_{Celkové} = \Delta P_{22Al} + \Delta P_{T1-6} + \Delta P_{T7} = 410,8 + 113,72 + 94,81 = 619,33 \text{ kW}$$

5.2 Návrh přípojky na hladině 35 kV

Vstupní hodnoty dané zadavatelem:

Synchronní generátor 6 ks

- Jmenovité napětí 6,3 kV
- Jmenovitý činný výkon každého 2 MW
- Jmenovitý zdánlivý výkon 2,5 MVA
- Rázová reaktance 12,5 %

Transformátor 6,3/35 kV 6 ks

- Jmenovité napětí nakrátko 5,9 %
- Jmenovitý zdánlivý výkon 2,5 MVA
- Ztráty naprázdno 1,92 kW
- Ztráty nakrátko 24 kW

Transformátor 35/110 kV

- Jmenovité napětí nakrátko 10,5 %
- Jmenovitý zdánlivý výkon 15 MVA
- Ztráty naprázdno 9,6 kW
- Ztráty nakrátko 120 kW

Uvažovaný účinník při výpočtech

- $\cos \varphi = 0,95 \Rightarrow \sin \varphi = 0,312$

Celková délka kabelového vedení

- $l = 25\,342\text{ m}$

Zkratový výkon v místě připojení Horní Životice na hladině 110 kV

- trojfázový $S''_{k3} = 7621\text{ MVA}$

5.2.1 Výpočet velikosti instalovaných výkonů transformátorů

Zde bude výpočet pro transformátory totožný jako v kapitole 5.1.1. Neboť i dosazované parametry jsou stejné.

5.2.2 Výpočtový proud

Velikost výpočtového proudu pro návrh vedení vn se vypočítá podle vztahu (4.2):

$$I_P = \frac{P_P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} = \frac{12 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 35 \cdot 10^3 \cdot 0,95} = 208,4\text{ A}$$

5.2.3 Návrh a dimenzování vedení na hladině 35 kV – jádro Cu

a) Výpočet průřezu vodiče

Dovolený úbytek napětí:

$$\Delta u_{dov} = \frac{5}{100} \cdot 35 \cdot 10^3 = 1750 \text{ V}$$

Z výpočtového výkonu si můžeme spočítat hodnoty činného a jalového proudu dle [12].

$$I_{\check{c}} = \frac{P_p}{\sqrt{3} \cdot U_s} = \frac{12 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 35 \cdot 10^3} = 197,95 \text{ A}$$

$$I_j = I_{\check{c}} \cdot \operatorname{tg} \varphi = 65,01 \text{ A}$$

Pro měrný odpor mědi platí:

$$\rho = \frac{1}{57} \quad (\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1})$$

Hodnota induktivní reaktance X_k se při změně průřezu kabelu mění pouze nepatrně a proto její hodnota může být v určitém rozsahu považována za konstantní.

Po dosazení hodnot do vzorce se dostane výsledný průřez vodiče:

$$\begin{aligned} S_{Cu} &= \frac{\sqrt{3} \cdot l \cdot I_{\check{c}} \cdot \rho}{\Delta u_{dov} - \sqrt{3} \cdot X_k \cdot l \cdot I_j} = \\ &= \frac{1}{57} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 25342 \cdot 208,4 \cdot 0,95}{1750 - \sqrt{3} \cdot 0,1665 \cdot 25,342 \cdot 65,01} = 119,6 \Rightarrow \underline{\underline{1 \times 185 \text{ mm}^2}} \end{aligned}$$

Průřezy jednožilového kabelového vedení 120 a 150 mm² nevyhověly daným podmínkám. Volím tedy jednožilové vedení 3x35 CXEKVCEY 1 x 185 mm² od firmy DRAKA [13]. Pro napětíovou hladinu 35 kV a měděné jádro. Hlavní parametry kabelu určené výrobcem:

- $S = 185 \text{ mm}^2$
- $R_k = 0,0991 \text{ } \Omega / \text{km}$ (při teplotě 20°C)
- $L_k = 0,53 \text{ mH} / \text{km}$ (v rovině)
- $I'_{kmax} = 29,3 \text{ kA/1s}$
- $I_{dov} = 411 \text{ A}$ (při 65°C)

b) Dimenzování vodiče podle dovoleného úbytku napětí

Úbytek napětí na vodiči se bude počítat podle vztahu (4.7). Vypočítaná hodnota by neměla překročit hodnotu dovoleného úbytku. V tomto případě je přípustný celkový pokles napětí až 5 % jmenovité hodnoty napětí.

Přepočtené parametry z katalogu:

Činný odpor je nutno přepočítat dle následujícího vzorce na provozní teplotu vodiče, při níž bude vodič možno provozovat. Hodnota teplotního součinitele α pro měď i hliník je 0,004.

$$R_{k65} = R_{k20} \cdot (1 + \alpha \cdot (\Delta v)) = \\ = 0,0991 \cdot (1 + 0,004 \cdot (65 - 20)) = 0,11694 \, \Omega / km$$

Výpočet indukční reaktance z katalogové hodnoty indukčnosti.

$$X_k = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 0,53 \, mH / km = 0,1665 \, \Omega / km$$

Po dosazení se spočítá jednofázový úbytek:

$$\Delta U_f = R_k \cdot l \cdot I_p \cdot \cos \varphi + X_k \cdot l \cdot I_p \cdot \sin \varphi = \\ = 0,1169 \cdot 25,342 \cdot 208,4 \cdot 0,95 + 0,1665 \cdot 25,342 \cdot 208,4 \cdot 0,312 = 860,93 \, V$$

Vyjádření procentního úbytku napětí vztaženého ke jmenovitému napětí:

$$\Delta u_{3f} \% = \frac{\sqrt{3} \cdot \Delta U_f}{U_n} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot 861}{35 \cdot 10^3} \cdot 100 = 4,26 \%$$

Tento kabel z hlediska dovoleného úbytku vyhovuje, neboť úbytek je menší než 5 %.

c) Dimenzování průřezu vodiče s ohledem na hospodárnost

V tomto hledisku se nebude vycházet ze vzorce podle vztahu (4.8), ale podle standardů ČEZ a.s., v nichž je uvedeno, že v základním provozním stavu by zatížení kabelu vn nemělo překročit 50 % jmenovité hodnoty proudu I_p .

$$\text{Zatížení \%} = \frac{I_p}{I_{dov}} \cdot 100 = \frac{208,4}{411} \cdot 100 = 50,7 \%$$

Po konzultaci se zadavatelem vodič vyhovuje, i když jeho zatížení není menší než 50 %. Této hodnotě se však velice blíží, navíc se nepředpokládá zvýšení zatížení tímto vodičem.

d) Dimenzování průřezu vodiče dle tepelných účinků zkratového proudu

Výpočty jsou provedeny podobným způsobem jako v předchozích případech. Rozdíl je pouze v napěťové hladině a typu vedení.

Výpočet reaktance X_A :

Reaktance soustavy:

$$X'_S = \frac{c \cdot U_n^2}{S_k} = \frac{1,1 \cdot 110000^2}{7621} = 1,746 \, \Omega \\ X_S = X'_S \cdot \left(\frac{U_V}{U} \right)^2 = 1,746 \cdot \left(\frac{35}{110} \right)^2 = 0,177 \, \Omega$$

Reaktance transformátoru T7:

$$X'_{T7} = \frac{u_K \cdot U_{nT}^2}{100 \cdot S_{nT}} = \frac{10,5 \cdot 110000^2}{100 \cdot 15 \cdot 10^6} = 84,17 \, \Omega$$

$$X_{T7} = X'_{T7} \left(\frac{U_V}{U} \right)^2 = 84,17 \cdot \left(\frac{35}{110} \right)^2 = 8,575 \, \Omega$$

Hodnota reaktance X_A je:

$$X_A = X_S + X_{T7} = j0,177 + j8,575 = \underline{j8,752 \, \Omega}$$

Výpočet reaktance X_B :

Výpočet reaktance generátorů:

$$X'_{G1-6} = \frac{1}{6} \cdot \frac{x_d'' \cdot U_n^2}{100 \cdot S_{nG}} = \frac{1}{6} \cdot \frac{12,5 \cdot 6300^2}{100 \cdot 2,5 \cdot 10^6} = 0,331 \, \Omega$$

$$X_{G1-6} = X'_{G1-6} \cdot \left(\frac{U_V}{U} \right)^2 = 0,331 \cdot \left(\frac{35}{6,3} \right)^2 = 10,21 \, \Omega$$

Výpočet reaktance transformátorů T1 až T6

$$X'_{T1-6} = \frac{1}{6} \cdot \frac{u_k \cdot U_n^2}{100 \cdot S_{nT}} = \frac{1}{6} \cdot \frac{5,9 \cdot 6300^2}{100 \cdot 2,5 \cdot 10^6} = 0,156 \, \Omega$$

$$X_{T1-6} = X'_{T1-6} \cdot \left(\frac{U_V}{U} \right)^2 = 0,156 \cdot \left(\frac{35}{6,3} \right)^2 = 4,818 \, \Omega$$

Reaktance vedení:

$$X_V = X_K \cdot l = 0,1665 \cdot 25,342 = 4,219 \, \Omega$$

Rezistance vedení:

$$R_V = R_K \cdot l = 0,1169 \cdot 25,342 = 2,962 \, \Omega$$

Hodnota reaktance X_B :

$$\begin{aligned} X_B &= X_{G1-6} + X_{T1-6} + X_V + R_V = \\ &= j10,21 + j4,818 + j4,219 + 2,962 = \underline{2,962 + j19,25 \, \Omega} \end{aligned}$$

Výpočet celkové impedance:

$$\frac{1}{Z_{(1)}} = \frac{1}{X_A} + \frac{1}{X_B} = \frac{1}{j8,752} + \frac{1}{2,962 + j19,25} \Rightarrow Z_{(1)} = 0,286 + j6,046 \, \Omega$$

$$|Z_{(1)}| = \sqrt{0,286^2 + 6,046^2} = \underline{6,053 \, \Omega}$$

Počáteční rázový zkratový proud pro trojfázový zkrat v místě „a“:

$$\underline{Ik_3''} = \frac{c \cdot Un}{\sqrt{3} \cdot |Z_{(1)}|} = \frac{1,1 \cdot 35 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6,053} = \underline{3,672 \, kA}$$

Ekvivalentní oteplovací proud:

Ekvivalentní oteplovací proud se vypočte dle vztahu (4.4). Pro místo zkratu za transformátorem v_{vn}/v_n a dobu trvání zkratu 0,5 s je součinitel pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu k_e vyčtený z tabulek 1,04. Použijeme zkratový proud v místě „a“ z výše uvedeného důvodu.

$$I_{ke} = k_e \cdot I_k'' = 1,04 \cdot 3672 = 3818,9 \text{ A}$$

Minimální zkratový průřez:

Výpočet minimálního zkratového průřezu vodiče se provede podle vzorce (4.5). Hodnota koeficientu K je 115 pro měděné jádro a kabel s PVC izolací. V našem případě se tato hodnota může využít.

$$S_{MIN} = \frac{I_{ke} \cdot \sqrt{t_k}}{K} = \frac{3818,9 \cdot \sqrt{0,5}}{115} = 23,5 \text{ mm}^2$$

Podmínka $S_{MIN} \leq S$, tedy $23,5 \leq 185$ je splněna.

Navržené kabelové vedení od firmy DRAKA s označením 3x35 CXEKVCEY 1x185 mm² vyhovuje všem podmínkám.

5.2.4 Výpočet ztrát

a) Výpočet činných ztrát pro zvolené kabelové vedení:

$$\Delta P_{35Cu} = 3 \cdot 0,11694 \cdot 25,342 \cdot 208,4^2 = 386,1 \text{ kW}$$

b) Výpočet činných ztrát transformátorů:

Jelikož byly zadány pro transformátory s převodem 6,3/35 kV a 35/110 kV stejné hodnoty ztrát naprázdno a nakrátko jako v případě transformátorů 6,3/22 kV a 22/110 kV, můžou být dosaženy z výše uvedených výpočtů.

c) Celkové ztráty přípojky:

Pro celkové ztráty přípojky na 35 kV a měděné jádro vedení se může napsat:

$$\Delta P_{Celkové} = \Delta P_{35Cu} + \Delta P_{T1-6} + \Delta P_{T7} = 386,1 + 113,72 + 94,81 = 594,63 \text{ kW}$$

5.2.5 Návrh a dimenzování vedení na hladině 35 kV – jádro Al

a) Výpočet průřezu vodiče

Dovolený úbytek napětí bude stejný, taktéž hodnota činného a jalového proudu.

Pro měrný odpor hliníku platí:

$$\rho = \frac{1}{33} \quad (\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1})$$

Hodnota induktivní reaktance X_k se při změně průřezu kabelu mění pouze nepatrně a proto její hodnota může být v určitém rozsahu považována za konstantní.

Po dosazení hodnot do vzorce se dostane výsledný průřez vodiče:

$$S_{Al} = \frac{\sqrt{3} \cdot l \cdot I_{\epsilon} \cdot \rho}{\Delta u_{dov} - \sqrt{3} \cdot X_k \cdot l \cdot I_j} =$$

$$= \frac{1}{33} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 25342 \cdot 208,4 \cdot 0,95}{1750 - \sqrt{3} \cdot 0,1728 \cdot 25,342 \cdot 65,01} = 209,5 \Rightarrow 1 \times 300 \text{ mm}^2$$

Zde je možno použít kabel 3x35 – AXEKVCEY 20/35 (40,5) kV 1x300

Průřez takových rozměrů by mohlo být problematické sehnat, proto je proveden přepočít na nižší hodnotu, která je standardně dodávána.

$$S_{Al} = \frac{\sqrt{3} \cdot l \cdot I_{\epsilon} \cdot \rho}{\Delta u_{dov} - \sqrt{3} \cdot X_k \cdot l \cdot I_j} =$$

$$= \frac{1}{33} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 25342 \cdot 208,4 \cdot 0,95}{1750 - \sqrt{3} \cdot 0,0958 \cdot 25,342 \cdot 65,01} = 178,4 \Rightarrow \underline{\underline{2 \times 120 \text{ mm}^2}}$$

Jednožilové kabelové vedení o průřezu 185 a 240 mm² nevyhovělo daným podmínkám, a proto volím dvě paralelní jednožilová vedení 2 x 3x35 AXEKVCEY 1 x 120 mm² od firmy DRAKA [13]. Pro napětíovou hladinu 35 kV a jádro z hliníku. Hlavní parametry kabelu určené výrobcem:

- S= 120 mm²
- R_k= 0,253 Ω / km (při teplotě 20°C)
- L_k= 0,61 mH / km (v rovině)
- I' _{kmax}= 12,4 kA/1s
- I_{dov}= 265 A (při 65°C)

b) Dimenzování vodiče podle dovoleného úbytku napětí

Úbytek napětí na vodiči se bude počítat podle vztahu (4.7). Vypočítaná hodnota by neměla překročit hodnotu dovoleného úbytku. V tomto případě je přípustný celkový pokles napětí až 5 % jmenovité hodnoty napětí.

Přepočtené parametry z katalogu:

Činný odpor je nutno přepočítat dle následujícího vzorce na provozní teplotu vodiče, při níž bude vodič možno provozovat. Hodnota teplotního součinitele α pro měď i hliník je 0,004.

$$R_{k65} = R_{k20} \cdot (1 + \alpha \cdot (\Delta v)) =$$

$$= 0,253 \cdot (1 + 0,004 \cdot (65 - 20)) = 0,2985 \text{ } \Omega / \text{ km}$$

Výpočet indukční reaktance z katalogové hodnoty indukčnosti.

$$X_k = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 0,61 \text{ mH / km} = 0,1916 \text{ } \Omega / \text{ km}$$

Protože se jedná o dvě paralelní vedení, hodnota činného odporu a indukční reaktance bude v následujícím vztahu pro výpočet úbytku napětí menší o jednu polovinu. Po dosazení se spočítá jednofázový úbytek:

$$\Delta U_f = R_k \cdot I \cdot I_p \cdot \cos \varphi + X_k \cdot I \cdot I_p \cdot \sin \varphi =$$

$$= 0,1493 \cdot 25,342 \cdot 208,4 \cdot 0,95 + 0,0958 \cdot 25,342 \cdot 208,4 \cdot 0,312 = 906,7 \text{ V}$$

Vyjádření procentního úbytku napětí vztaženého ke jmenovitému napětí:

$$\Delta u_{3f} \% = \frac{\sqrt{3} \cdot \Delta U_f}{U_n} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot 906,7}{35 \cdot 10^3} \cdot 100 = 4,49 \%$$

Tento kabel z hlediska dovoleného úbytku vyhovuje, neboť úbytek je menší než 5 %.

c) Dimenzování průřezu vodiče s ohledem na hospodárnost

V tomto hledisku se nebude vycházet ze vzorce podle vztahu (4.8), ale podle standardů ČEZ a.s., v nichž je uvedeno, že v základním provozním stavu by zatížení kabelu vn nemělo překročit 50 % jmenovité hodnoty proudu I_p .

Dovolená zatížitelnost kabelu I_{dov} se rovná jmenovité hodnotě proudu I_n kabelu. Hodnota výpočtového proudu I_p bude o polovinu menší, jedná se o dvě paralelní vedení. Vznikne jednoduchý vztah:

$$\text{Zatížení \%} = \frac{I_p}{I_{dov}} \cdot 100 = \frac{104,2}{265} \cdot 100 = 39,4 \%$$

Výpočtový proud je zde nutno podělit dvěma, protože se jedná o dvě paralelní vedení. Vodič vyhovuje, neboť jeho zatížení je menší než 50 %.

d) Dimenzování průřezu vodiče dle tepelných účinků zkratového proudu

I pro tento bod budou schémata i postup výpočtů stejný. Jediný rozdíl bude v parametrech kabelového vedení.

Výpočet reaktance X_A :

Pro výpočet reaktance soustavy je nutné zjistit hodnotu napěťového činitele pro příslušnou napěťovou hladinu. Opět hodnotu nalezneme v tabulce 5–1 a její velikost je stejná.

Reaktance soustavy:

$$X'_S = \frac{c \cdot U_n^2}{S_k} = \frac{1,1 \cdot 110000^2}{7621} = 1,746 \Omega$$

$$X_S = X'_S \cdot \left(\frac{U_V}{U} \right)^2 = 1,746 \cdot \left(\frac{35}{110} \right)^2 = 0,177 \Omega$$

Reaktance transformátoru T7:

$$X'_{T7} = \frac{u_K \cdot U_{nT}^2}{100 \cdot S_{nT}} = \frac{10,5 \cdot 110000^2}{100 \cdot 15 \cdot 10^6} = 84,17 \Omega$$

$$X_{T7} = X'_{T7} \cdot \left(\frac{U_V}{U} \right)^2 = 84,17 \cdot \left(\frac{35}{110} \right)^2 = 8,575 \Omega$$

Hodnota reaktance X_A je:

$$X_A = X_S + X_{T7} = j0,177 + j8,575 = \underline{j8,752 \Omega}$$

Výpočet reaktance X_B :

Výpočet reaktance generátorů:

$$X'_{G1-6} = \frac{1}{6} \cdot \frac{x_d'' \cdot U_n^2}{100 \cdot S_{nG}} = \frac{1}{6} \cdot \frac{12,5 \cdot 6300^2}{100 \cdot 2,5 \cdot 10^6} = 0,331 \Omega$$

$$X_{G1-6} = X'_{G1-6} \cdot \left(\frac{U_V}{U} \right)^2 = 0,331 \cdot \left(\frac{35}{6,3} \right)^2 = 10,208 \Omega$$

Výpočet reaktance transformátorů T1 až T6

$$X'_{T1-6} = \frac{1}{6} \cdot \frac{u_k \cdot U_n^2}{100 \cdot S_{nT}} = \frac{1}{6} \cdot \frac{5,9 \cdot 6300^2}{100 \cdot 2,5 \cdot 10^6} = 0,156 \Omega$$

$$X_{T1-6} = X'_{T1-6} \cdot \left(\frac{U_V}{U} \right)^2 = 0,156 \cdot \left(\frac{35}{6,3} \right)^2 = 4,818 \Omega$$

Reaktance vedení:

$$X_V = X_K \cdot l = 0,0958 \cdot 25,342 = 2,428 \Omega$$

Rezistance vedení:

$$R_V = R_K \cdot l = 0,1493 \cdot 25,342 = 3,784 \Omega$$

Hodnota reaktance X_B :

$$\begin{aligned} X_B &= X_{G1-6} + X_{T1-6} + X_V + R_V = \\ &= j10,208 + j4,818 + j2,428 + 3,784 = \underline{3,784 + j17,454 \Omega} \end{aligned}$$

Výpočet celkové impedance:

$$\frac{1}{Z_{(1)}} = \frac{1}{X_A} + \frac{1}{X_B} = \frac{1}{j8,752} + \frac{1}{3,784 + j17,454} \Rightarrow Z_{(1)} = 0,413 + j5,889 \Omega$$

$$|Z_{(1)}| = \sqrt{0,413^2 + 5,889^2} = \underline{5,903 \Omega}$$

Počáteční rázový zkratový proud pro trojfázový zkrat v místě „a“:

$$\underline{Ik_3''} = \frac{c \cdot Un^3}{\sqrt{3} \cdot |Z_{(1)}|} = \frac{1,1 \cdot 35 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 5,903} = \underline{3,765 kA}$$

Ekvivalentní oteplovací proud:

Ekvivalentní oteplovací proud se vypočte dle vztahu (4.4). Pro místo zkratu za transformátorem v_{vn}/v_n a dobu trvání zkratu 0,5 s je součinitel pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu k_e vyčtený z tabulek 1,04. Použijeme zkratový proud v místě „a“ z výše uvedeného důvodu.

$$I_{ke} = k_e \cdot I_k'' = 1,04 \cdot 3765 = 3915,6 \text{ A}$$

Minimální zkratový průřez:

Výpočet minimálního zkratového průřezu vodiče se provede podle vzorce (4.5). Hodnota koeficientu K je 74 pro hliníkové jádro a kabel s PVC izolací. V našem případě se tato hodnota může využít.

$$S_{MIN} = \frac{I_{ke} \cdot \sqrt{t_k}}{K} = \frac{3915,6 \cdot \sqrt{0,5}}{74} = 37,5 \text{ mm}^2$$

Podmínka $S_{MIN} \leq S$, tedy $37,5 \leq 120$ je splněna.

Navržené paralelní kabelové vedení od firmy DRAKA s označením 2 x 3x35 AXEKVCEY 1x120 mm² vyhovuje všem podmínkám.

5.2.6 Výpočet ztrát

a) Výpočet činných ztrát pro zvolené kabelové vedení:

Jedná se o dvě paralelní vedení tudíž hodnota R_k bude o jednu polovinu menší. Může se tedy dosadit:

$$\Delta P_{35Al} = 3 \cdot 0,1494 \cdot 25,342 \cdot 208,4^2 = 493,3 \text{ kW}$$

b) Výpočet činných ztrát transformátorů:

Výpočty ztrát transformátorů budou stejné, protože se v zapojení změnil pouze typ vedení.

c) Celkové ztráty přípojky:

Pro celkové ztráty přípojky na 35 kV a hliníkové jádro vedení můžeme napsat:

$$\Delta P_{Celkové} = \Delta P_{35Al} + \Delta P_{T1-6} + \Delta P_{T7} = 493,3 + 113,72 + 94,81 = 701,83 \text{ kW}$$

6 Výběr optimální varianty

Jak plyne z předchozí kapitoly a ze zadání, vznikly čtyři varianty. Na základě těchto variant je dalším úkolem vybrat tu, která je z různých hledisek optimální. Nabízející se možnosti variant s označením „a“ tedy jsou:

- a_1 přípojka na hladině 22 kV vedení Cu
- a_2 přípojka na hladině 22 kV vedení Al
- a_3 přípojka na hladině 35 kV vedení Cu
- a_4 přípojka na hladině 35 kV vedení Al

Pomocí vícekritériálního rozhodování budou jednotlivé varianty výše uvedených možností srovnány, z nichž se podle zvolených kritérií a jejich vah vybere varianta optimální.

Jak je výše uvedeno, k tomu, aby mohla být provedena analýza dané metody, je nutné zvolit si kritéria „f“. Zvolené kritéria:

- Kritérium f_1 čistá současná hodnota (mil. Kč)
- Kritérium f_2 činné ztráty přípojky (kW)
- Kritérium f_3 celkové investiční náklady přípojky (mil. Kč)
- Kritérium f_4 náhradní transformátor pro připojení do rozvodny 110 kV (mil. Kč)

Na základě požadavku zadavatele bude výběr proveden pomocí multikritériální vyhodnocovací metody shody a neshody CDA, která je založena na porovnávání alternativ po dvojicích.

6.1 Celkové činné ztráty přípojky:

Celkové činné ztráty přípojky se dostanou sečtením ztrát transformátorů a vedení. Výpočet celkových ztrát je proveden v páté kapitole. Pro přehlednost jsou hodnoty těchto ztrát uvedeny do následující tabulky:

Tab. 6–1 Celkové činné ztráty přípojky

Varianta	Činné ztráty (kW)
a_1	580,33
a_2	619,33
a_3	594,63
a_4	701,83

6.2 Celkové investiční náklady přípojky:

Pro získání celkových investičních nákladů je zapotřebí znát ceny jednotlivých komponent přípojky. Pro určení celkových investičních nákladů byly zadavatelem poskytnuty následující hodnoty pro níže uvedené části přípojky.

6.2.1 Investiční náklady transformátorů:

Tab. 6–2 Ceny jednotlivých transformátorů

Typ transformátoru	Cena (Kč/ks)
6,3/22 kV, 2,5 MVA	2 193 000
22/110 kV, 15 MVA	6 502 500
6,3/35 kV, 2,5 MVA	2 533 000
35/110 kV, 15 MVA	8 066 500

Pro určení celkových investičních nákladů za transformátory na hladině 22 kV se musí uvažovat cena šesti transformátorů typu 6,3/22 kV, 2,5 MVA, jak plyne ze zadání a jednoho 22/110 kV, 15 MVA. Pak se hodnota rovná:

$$Celkem = (2\,193\,000 \cdot 6) + 6\,502\,500 = 19\,660\,500 \text{ Kč} \quad (6.1)$$

Obdobně je tomu pro celkovou cenu transformátorů na hladině 35 kV:

$$Celkem = (2\,533\,000 \cdot 6) + 8\,066\,500 = 23\,264\,500 \text{ Kč} \quad (6.2)$$

6.2.2 Investiční náklady vedení:

Tab. 6–3 Ceny jednotlivých typů kabelového vedení

Typ kabelu	Cena kabelu (Kč/m)	Celková délka kabelů (m)	Celková cena kabelů (Kč)
22 – CXEKVCEY 1x240	548,12	152 052	83 342 743
22 – AXEKVCEY 1x240	201,84	228 078	46 035 264
35 – CXEKVCEY 1x185	541,89	76 026	41 197 730
35 – AXEKVCEY 1x120	185,48	152 052	28 202 605

6.2.3 Celkové investiční náklady:

K získání celkových investičních nákladů přípojky je nutno sečíst cenu zemních prací (14 033 928 Kč), celkovou cenu kabelu a celkovou cenu za transformátory. Po sečtení se dostanou následující hodnoty, pro celkové investiční náklady:

Tab. 6–4 Celkové investiční náklady přípojky

Varianta	Celkové investiční náklady (Kč)
a ₁	117 037 171
a ₂	79 729 692
a ₃	78 496 158
a ₄	65 501 033

6.3 Čistá současná hodnota

Hodnota čisté současné hodnoty NPV je finanční veličina, která vyjadřuje současnou hodnotu budoucích peněžních toků a případného současného výdaje. Pro výpočet efektivnosti investic je použito tabulkového editoru Microsoft Excel. Kde do vytvořeného modelu hodnocení ekonomické efektivnosti jsou zadány hodnoty z tabulky 6–4, instalovaný výkon, celkové činné ztráty přípojky a nutné předpoklady k výpočtu, které jsou uvedeny v Tab. 6–5.

Tab. 6–5 Předpokládané hodnoty pro výpočet NPV

Výkupní cena opatřené elektrické energie dodané do sítě 2012 pro VE	2230 Kč/MWh
Trend růstu ceny opatřené elektrické energie	1,02
Náklady na provoz, opravy a údržbu	0,8 %
Trend růstu nákladů na provoz, opravy a údržbu	1,085
Diskontní sazba	12 %
Daň z příjmu	19 %

Na základě těchto vstupních hodnot je velikost hodnoty NPV vypočítána pro sledované období. Příklad výpočtu NPV je uveden v přílohách formou tabulky Tab. 2, pro variantu a₁. U ostatních variant je výpočet NPV obdobný. Výsledky jsou uvedeny v Tab.6–6.

Tab. 6–6 NPV pro dané varianty

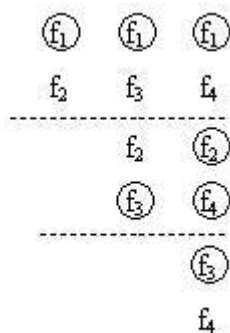
Varianta	NPV (mil. Kč)
a_1	1030,577
a_2	1059,286
a_3	1061,241
a_4	1067,618

6.4 Multikriteriální analýza

Na základě výše uvedených výsledných hodnot kriterií pro dané varianty vznikne kriteriální matice, která nabývá následující tvar:

$$\begin{matrix} & f_1 & f_2 & f_3 & f_4 \\ \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1030,577 & 580,33 & 117,037 & 6,502 \\ 1059,286 & 619,33 & 79,729 & 6,502 \\ 1061,241 & 594,63 & 78,496 & 8,066 \\ 1067,618 & 701,83 & 65,501 & 8,066 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (6.3)$$

Dalším nutným krokem je určení vah jednotlivých kriterií. Určení těchto vah se provede pomocí Fullerova trojúhelníku. Zde se srovnávají dvojce kriterií. Uspořádání v tomto trojúhelníku se provede takovým způsobem, aby se každá dvojice kriterií vyskytla pouze jednou. Po té je podle subjektivního rozhodnutí jedince zakroužkováno kritérium, které je považováno za důležitější.



Obr. 6–1 Fullerův trojúhelník

Vyhodnocení Fullerova trojúhelníku je v Tab. 6–7. Podle počtu kroužků, které se nacházejí na jednotlivých kriteriích, jsou přiřazovány body. Jeden bod jeden kroužek. Je-li však některé kritérium zakroužkované zároveň s jiným, považujeme ho za stejně důležité a přiděluje se pouze 0,5 bodu:

Tab. 6–7 Přiřazení jednotlivých bodů

Kritérium	Body
f_1	3
f_2	0,5
f_3	2
f_4	0,5

Pro získání vah jednotlivých kritérií se použije následujícího vztahu:

$$v_j = \frac{n_j}{N} \quad (6.4)$$

- n_j počet kroužků j-tého kritéria
- N součet všech zakroužkovaných kritérií. [16]

Tab. 6–8 Váhy jednotlivých kritérií

Kritérium		v_j
f_1	NPV	0,5
f_2	celkové činné ztráty přípojky	0,0833
f_3	celkové investiční náklady přípojky	0,3334
f_4	záložní transformátor pro připojení na 110 kV	0,0833

Získané váhy kritérií Tab. 6–8 a matice (6.3) se dosadí do školního programu MCA7, který provede požadovanou vyhodnocovací metodu. Jak bylo uvedeno v úvodu této kapitoly úkolem je provést vyhodnocení dle metody CDA. Výsledky vygenerované programem jsou:

Tab. 6–9 Výsledné hodnoty vygenerované pomocí programu MCA7

Pořadí	Označení varianty	CDA
1	a_4	0,8967
2	a_3	1,5887
3	a_2	2,1646
4	a_1	5,1031

Z výsledků metody CDA plyne, že čím nižší je hodnota, tím je varianta lepší. Nejlépe z provedené analýzy vyšla varianta s označením a_4 , což je navrhnutá přípojka na hladině 35 kV

a vedení z hliníku. Na základě analyzovaných údajů se tato varianta jeví jako neoptimálnější.

Naopak nejhůře z analýzy vyšla varianta a_1 , která označuje variantu přípojky na hladině 22 kV a měděné kabelové vedení.

7 Technicko-ekonomické zhodnocení

Úkolem praktické části diplomové práce bylo navrhnout přípojku pro park větrných elektráren. Tento park se má nacházet v oblasti Rejchartice a má se připojit do rozvodny Horní Životice. Návrh jsem provedl pro čtyři možnosti, a to:

- přípojka na hladině 22 kV a kabelové vedení z mědi
- přípojka na hladině 22 kV a kabelové vedení z hliníku
- přípojka na hladině 35 kV a kabelové vedení z mědi
- přípojka na hladině 35 kV a kabelové vedení u hliníku

Investiční náklady jsou nejnižší pro přípojku na hladině 35 kV a kabelové vedení z hliníku, a to celkem 65 501 033 Kč. Naopak největších investičních nákladů je třeba vynaložit pro realizaci přípojky na hladině 22 kV a kabelové vedení z mědi – 117 037 171 Kč, což je téměř dvojnásobek oproti předchozí variantě. A to i navzdory faktu, že cena transformátorů na hladině 35 kV je o něco vyšší, což můžeme vysledovat ze vzorců 6.1 a 6.2. Je to dáno především materiálem jádra vodiče a celkovou délkou vedení.

Průřezy u některých variant nabývají takových rozměrů, které se nevyrábí, nebo jsou špatně dostupné. Proto se daná situace řeší použitím standardně dodávaných kabelů, které se do obvodu zařadí paralelně. Tím dojde k rozložení proudu a je možné použít menší průřezy. Celková délka paralelních kabelů je pak logicky větší a tím i jejich cena. Při případné poruše je však tento kabel lehce dostupný a nemusí se čekat, než se vyrobí. To nemůžeme říct při použití dražšího nestandardního kabelu, který se musí nechat vyrobit na zakázku. Vedlo by to k odstavení výroby elektráren na delší dobu a tím k dalším finančním ztrátám.

Hlavním úskalím variant vedení z měděného jádra je to, že jejich cena za jeden metr činí téměř trojnásobek ceny kabelového vedení z hliníku. I přesto, že je jejich průřez menší a celková délka vedení oproti hliníkovému menší, jsou investiční náklady větší.

Ekonomická výnosnost investic pro dané varianty mi vyšla nelépe taktéž pro variantu na hladině 35 kV a kabelové vedení z hliníku, jak plyne z Tab. 6–6, kde bychom měli výnosnost za 20 let 1067,618 mil. Kč. Nejhuře za stejné období vyšla varianta přípojky na hladině 22 kV a kabelové vedení z mědi – 1030,577 mil. Kč.

Pro variantu přípojky na hladině 22 kV a kabelového vedení z hliníku činily celkové investiční náklady 79 729 692 Kč, to je zhruba o jeden milion více než u navrhnuté varianty o napětí 35 kV a kabelového vedení z mědi. Je to dáno především délkou vedení jak můžeme porovnat z Tab. 6–4. Délka kabelů je pro variantu z hliníku na 22 kV výrazně vyšší a tím se celková cena vyrovnává dražší variantě, což je kabelové vedení z mědi na hladině 35 kV. Ekonomická výnosnost těchto variant je pro měděné vedení 1061,241 mil. Kč, což je zhruba o dva milióny více než pro hliníkové kabelové vedení na 22 kV.

Při přenosu zadaného výkonu na hladině 22 kV vodiči prochází větší proudy, než na hladině 35 kV. Na dimenzované vodiče jsou tak kladeny větší nároky, proto je nutné používat je v paralelním provedení. Tím narůstá celková délka a jejich ceny jsou vyšší.

Porovnání jednotlivých variant je uvedeno v předchozí kapitole, kde je na základě dosazených kritérií vybrána optimální varianta. Z ekonomického i technického hlediska je možno říct, že přípojka na hladině 35 kV a kabelové vedení z hliníku je nejvýhodnější.

Závěr

Ve výše uvedených kapitolách jsem se snažil vnést čtenáře do problematiky sítí vysokého napětí, kde jsem provedl jejich stručný rozbor, popis typů atp. Dále jsem se pokusil nastínit podmínky, které musí být splněny pro připojení generátoru do distribuční sítě a zpětné vlivy, jimiž větrné elektrárny působí na distribuční síť. V kapitole nazývané obecné zásady při projektování venkovního i kabelového vedení jsem popsal podle jakých zásad vodič dimenzovat, aby obstál při plnění své funkce. Z této kapitoly je pak čerpáno při praktických výpočtech kabelu.

Stěžejní část práce tvoří především samotný návrh přípojky pro větrné elektrárny. Zde jsem provedl nejprve výpočet velikosti instalovaného výkonu transformačních stanic. A to jak pro synchronní generátory z větrných elektráren na danou hladinu, tak z této hladiny na 110 kV. Tato hladina je v rozvodně Horní Životice, na níž se park větrných elektráren má připojit. Úkolem bylo provést návrh na hladinách 22 kV a 35 kV pro dva typy jádra vodiče – jádro z hliníku a jádro z mědi. Vznikly tak čtyři možnosti kabelového vedení, které bylo třeba navrhnout. Jak jsem již zmínil, jedná se o kabelové vedení, neboť nadzemní nebylo povoleno příslušnými úřady. Pro všechny vzniklé možnosti jsem provedl výpočty průřezů. Tyto navržené průřezy byly následně zkontrolovány dle různých hledisek, které jsou při návrhu důležité.

V další fázi práce jsem si určil kritéria, na jejichž základě jsem provedl výběr optimální varianty pomocí multikriteriální analýzy. Pro zvolená kritéria jsem pomocí Fullerova trojúhelníku provedl výpočet vah jednotlivých kritérií. Tyto váhy jsem spolu s kritérii vložil do školního programu MCA7 a vygeneroval hodnoty pro zkoumanou metodu CDA. Program určil pořadí variant od nejlepší po nejhorší.

V poslední kapitole jsem vyhodnotil jednotlivé varianty přípojky po stránce technické i po stránce ekonomické. Toto hodnocení je shrnutím poznatků získaných z výpočetní části práce a z kapitoly výběr optimální varianty. Nejlépe z navrhovaných variant vyšla přípojka na hladině 35 kV a kabelové vedení z hliníku, jak plyne z předešlé kapitoly.

Předložená diplomová práce může být uplatněna v praxi, jelikož navrhuje a vybírá vhodnou variantu přípojky pro konkrétní park větrných elektráren. Mohla by ušetřit čas a finance firmě, která bude přípojku realizovat. Možné rozšíření práce spatřuji v doplnění o návrh ochrany přípojky a návrh investičních nákladů dalších komponent, čímž by se dosáhlo ještě většího praktického využití práce. Využitelnost vidím také pro studenty technických oborů, kteří by ji mohli používat jako učební text, protože shrnuje a obsahuje mnoho teoretických i praktických poznatků.

Seznam použité literatury

- [1] Dohnálek,P.: Ochrany pro průmysl a energetiku, SNTL, 1978
- [2] Hodinka,M.: Přenos a rozvod elektrické energie, SNTL, 1989
- [3] Gurecký,J.: Sylaby k předmětu Přenos a rozvod elektrické energie
- [4] Hradílek,Z.: Elektroenergetika distribučních a průmyslových sítí, VŠB-TU Ostrava, 2008
- [5] Němeček,F.: Přenos a rozvod elektrické energie, SNTL, 1989 Praha
- [6] Santarius,P.: Elektrické stanice a vedení, Skripta VŠB-TU Ostrava, 1990
- [7] Trojánek,Z.: Přechodné jevy v elektrizačních soustavách, SNTL, 1987
- [8] Dimenzování vedení [online].[Citováno 24. listopadu 2011]. Dostupné z WWW: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/hgf/rozvody_lomy/09_dimenzovani.pdf
- [9] Dimenzování vodičů [online].[Citováno 16. listopadu 2011]. Dostupné z WWW: http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/projektovani_elektrickych_distribucnich_siti.htm
- [10] Pravidla provozování distribučních soustav [online].[Citováno 10. listopadu 2011]. Dostupné z WWW: <http://www.cezdistribuce.cz/cs/energeticka-legislativa/pravidla-provozovani-ds/ppds-2009.html>
- [11] Problematika připojování větrných elektráren do distribuční sítě [online].[Citováno 23. listopadu 2011]. Dostupné z WWW: <http://www.tzb-info.cz/4279-problematika-pripojovani-vetrnych-elektren-do-distribucni-site>
- [12] Cvičení z elektroenergetiky [online].[Citováno 28. listopadu 2011]. Dostupné z WWW: http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/f_studium.htm
- [13] Katalog produktů DRAKA [online].[Citováno 14. února 2012]. Dostupné z WWW: <http://www.draka.cz/cs/vyrobky-a-sluzby/katalog/globalni-hledani>
- [14] Silové kabely [online].[Citováno 7. března 2012]. Dostupné z WWW: <http://pdf.directindustry.com/pdf/nkt-cables/power-cables/17613-49090-145.html>
- [15] Instalovaný výkon transformátorů [online].[Citováno 11. března 2012]. Dostupné z WWW: https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:TD9-agWSHkoJ:courseware.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id%3D37515+stanoven%C3%AD+instalovan%C3%A9ho+v%C3%BDkonu+trafostanic&hl=cs&gl=cz&pid=bl&srcid=ADGEESg31pDEbNHocpHiFp_VCb44KIsF8Q5ZE2Aqc6wugMuRfmExO1SbNt8kXMV49gUTdPvYeesV2JmVbM_x_6t_JZwjGTnKhX5ul0jBgigUTFEjCrWpxkCWXXvt_UcfVFcycZzjug-&sig=AHIEtbRrdMvRUj52_s4DC_Da1FG8EaC9WQ
- [16] Vícekriteriální hodnocení [online].[Citováno 1. dubna 2012]. Dostupné z WWW: http://www2.ef.jcu.cz/~jfrieb/rmp/data/teorie_oa/VICEKRIT_HODNOCENI.pdf

Seznam příloh:

- Příloha I.** Tabulkové hodnoty součinitele k_e a koeficientu K
- Příloha II.** Příklad hodnocení ekonomické efektivity pro přípojku na hladině 22 kV a vedení Cu
- Příloha III.** Vývoj čisté současné hodnoty pro přípojku na 22 kV a vedení Cu za sledované období

Příloha I:

Tab. 1 Tabulkové hodnoty součinitele k_e a koeficientu K [12]

Součinitele k_e pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu bez uvažování vlivu asynchronních motorů										
Místo zkratu	T_a (s)	k_e pro t_k (s)								
		0,02	0,035	0,05	0,08	0,1	0,2	0,5	1,0	3,0
za alternátorem do 55 MW ¹⁾	0,161	1,65	1,60	1,58	1,54	1,50	1,46	1,23	1,08	1,03
v soustavě ²⁾										
vvn a zvn	0,03	1,44	1,32	1,24	1,16	1,13	1,07	1,03	1,01	1,00
vvn	0,02	1,35	1,24	1,17	1,11	1,09	1,05	1,02	1,01	1,00
nn	0,01	1,24	1,15	1,10	1,07	1,05	1,03	1,01	1,00	1,00
v kabelovém rozvodu nn ²⁾	0,008	1,18	1,11	1,08	1,05	1,04	1,02	1,01	1,00	1,00
za transformátory ³⁾										
vvn/vn nebo vn/nn	0,036	1,49	1,37	1,29	1,20	1,17	1,09	1,04	1,02	1,01
vn/nn do 250 kVA včetně	0,008	1,18	1,11	1,08	1,05	1,04	1,02	1,01	1,00	1,00
do 630 kVA včetně	0,014	1,29	1,18	1,13	1,09	1,07	1,04	1,01	1,01	1,00
do 1600 kVA včetně	0,019	1,35	1,24	1,17	1,11	1,09	1,05	1,02	1,01	1,00
¹⁾ Pro zkrat v blízkosti alternátoru nebo za blokovým transformátorem ²⁾ Pro zkrat vzdálený od napájecího transformátoru i alternátoru (impedance mezi místem zkratu a napájecím transformátorem je větší než 10% ze sousledné impedance zkratového obvodu) ³⁾ Pro zkrat v blízkosti sekundární strany transformátoru (impedance mezi místem zkratu a napájecím transformátorem je do 10% sousledné impedance zkratového obvodu)										

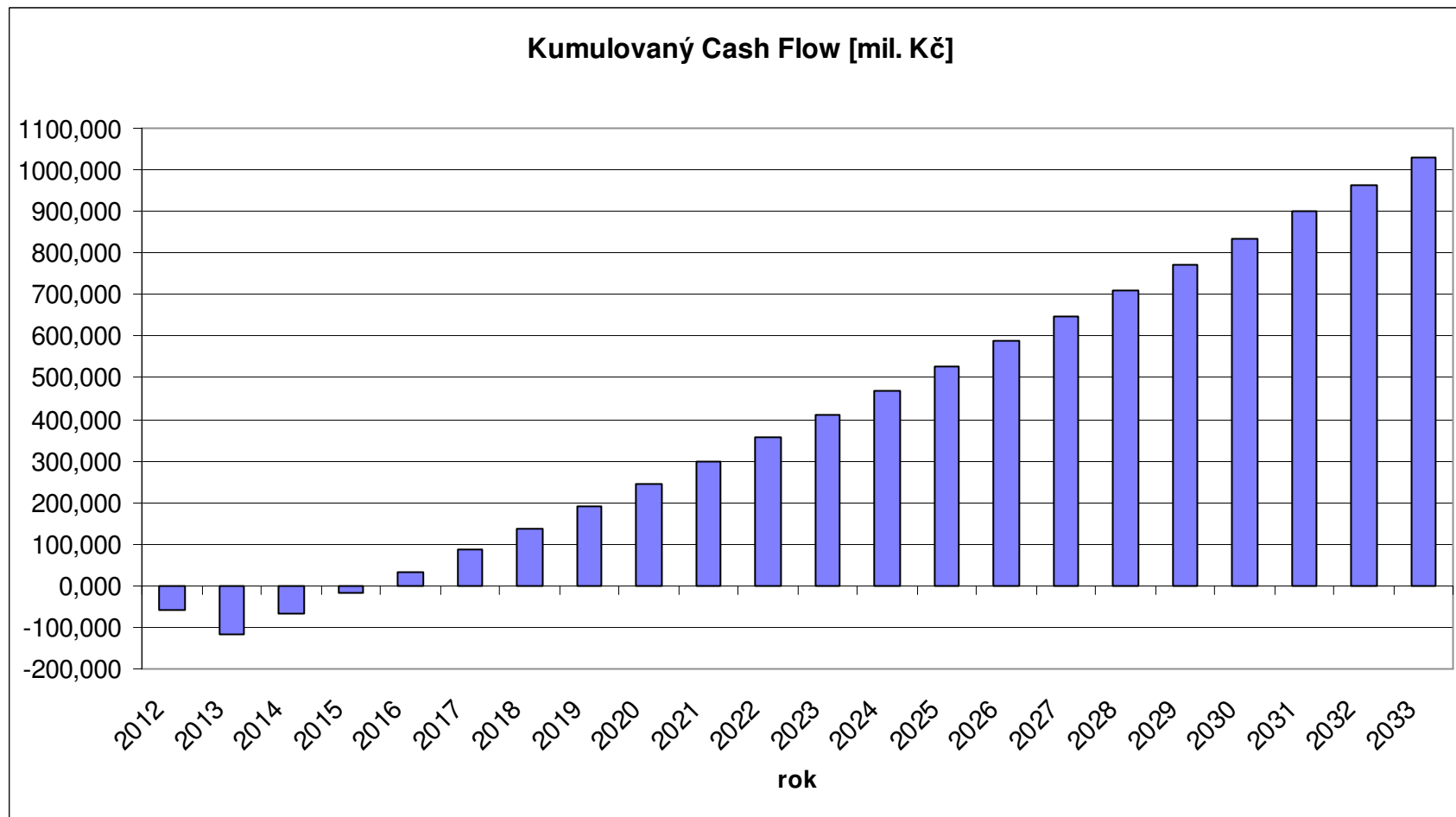
Koeficient K pro dimenzování vedení podle tepelných účinků zkratového proudu				
Součinitel K	materiál jádra vodiče			
	Cu		Al	
	materiál izolace vodiče			
	PVC	Př.ž	PVC	Př.ž
	115	135	74	87

Příloha II:

Tab. 2 Příklad hodnocení ekonomické efektivity pro přípojku na hladině 22 kV a vedení Cu

období [rok]	vyrobená energie [MWh]	tržby [mil. Kč]	výkupní cena energie [Kč/MWh]	provoz opravy a údržba [mil. Kč]	ztráty elektr. energie [MWh]	náklady na ztráty [mil. Kč]	odpisy			provozní náklady celkem [mil. Kč]	základ daně [mil. Kč]	daň z příjmu [mil. Kč]	hospod. výst. po zdanění [mil. Kč]	provozní cash flow [mil. Kč]	invest. náklady [mil. Kč]	cash flow [mil. Kč]	diskontní faktor [-]	aktual. cash flow [mil. Kč]	kumul. cash flow [mil. Kč]
							3. odpis. skupina [mil. Kč]	4. odpis. skupina [mil. Kč]	celkem [mil. Kč]										
2012	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	59	-58,519	0,893	-57,626	-57,626
2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	59	-58,519	0,797	-57,721	-115,347
2014	26400	58,872	2230	0,471	512	1,141	1,638	4,869	6,507	8,119	50,753	9,643	41,110	47,617	0	47,617	0,712	48,328	-67,019
2015	26400	60,049	2275	0,511	512	1,164	3,004	9,251	12,255	13,930	46,119	8,763	37,357	49,612	0	49,612	0,636	50,247	-16,772
2016	26400	61,250	2320	0,554	512	1,188	2,731	8,764	11,495	13,237	48,014	9,123	38,891	50,386	0	50,386	0,567	50,953	34,181
2017	26400	62,475	2366	0,602	512	1,211	2,458	8,277	10,735	12,547	49,928	9,486	40,442	51,176	0	51,176	0,507	51,683	85,864
2018	26400	63,725	2414	0,653	512	1,236	2,184	7,790	9,974	11,863	51,862	9,854	42,008	51,983	0	51,983	0,452	52,435	138,300
2019	26400	64,999	2462	0,708	512	1,260	1,911	7,303	9,214	11,183	53,817	10,225	43,592	52,806	0	52,806	0,404	53,210	191,509
2020	26400	66,299	2511	0,768	512	1,285	1,638	6,816	8,454	10,508	55,792	10,600	45,191	53,645	0	53,645	0,361	54,006	245,515
2021	26400	67,625	2562	0,834	512	1,311	1,364	6,329	7,694	9,839	57,787	10,979	46,807	54,501	0	54,501	0,322	54,823	300,338
2022	26400	68,978	2613	0,905	512	1,337	1,093	5,843	6,936	9,178	59,800	11,362	48,438	55,374	0	55,374	0,287	55,661	356,000
2023	26400	70,357	2665	0,981	512	1,364	0,820	5,356	6,176	8,521	61,836	11,749	50,087	56,263	0	56,263	0,257	56,520	412,519
2024	26400	71,765	2718	1,065	512	1,391	0,547	4,869	5,415	7,872	63,893	12,140	51,753	57,169	0	57,169	0,229	57,398	469,917
2025	26400	73,200	2773	1,155	512	1,419	0,273	4,382	4,655	7,230	65,970	12,534	53,436	58,091	0	58,091	0,205	58,296	528,213
2026	26400	74,664	2828	1,254	512	1,448	0,000	3,895	3,895	6,596	68,068	12,933	55,135	59,030	0	59,030	0,183	59,213	587,425
2027	26400	76,157	2885	1,360	512	1,477	0,000	3,408	3,408	6,245	69,912	13,283	56,629	60,037	0	60,037	0,163	60,200	647,626
2028	26400	77,680	2942	1,476	512	1,506	0,000	2,921	2,921	5,903	71,777	13,638	58,140	61,061	0	61,061	0,146	61,206	708,832
2029	26400	79,234	3001	1,601	512	1,536	0,000	2,434	2,434	5,572	73,662	13,996	59,666	62,101	0	62,101	0,130	62,231	771,063
2030	26400	80,819	3061	1,737	512	1,567	0,000	1,948	1,948	5,252	75,567	14,358	61,209	63,157	0	63,157	0,116	63,273	834,336
2031	26400	82,435	3123	1,885	512	1,598	0,000	1,461	1,461	4,944	77,491	14,723	62,768	64,228	0	64,228	0,104	64,332	898,668
2032	26400	84,084	3185	2,045	512	1,630	0,000	0,974	0,974	4,649	79,434	15,093	64,342	65,316	0	65,316	0,093	65,408	964,076
2033	26400	85,765	3249	2,219	512	1,663	0,000	0,487	0,487	4,369	81,397	15,465	65,931	66,418	0	66,418	0,083	66,501	1030,577

Příloha III:



Obr. 1 Vývoj čisté současné hodnoty pro přípojku na 22 kV a vedení Cu za sledované období